

145664

87.1083  
RMT  
4

# 1963年铁路科学技术论文报告会文集

## 第 4 辑

# 车 辆



1963年铁路科学技术論文报告会文集

第 4 輯

# 車 輛

車輛专业会議学术委員会选編

人 民 鉄 道 出 版 社

1964年・北京

1963年铁路科学技术论文报告会文集

第 4 輯

車 輛

車輛专业会議学术委员会选編

人民铁道出版社出版、发行

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 010 号

人民铁道出版社印刷厂印

书号1969 开本 $787 \times 1092_{16}^1$  印张 $4\frac{7}{8}$  字数 117 千

1 9 6 4 年12月第 1 版

1 9 6 4 年12月第 1 版第 1 次印刷

印数 0001—1,020 册 定价 (科六) 0.65 元

# 目 录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 制动装置两风缸压力平衡过程时间的计算.....  | 1  |
| 实制动时间与实制动距离计算公式的简化.....  | 10 |
| 液压减振器的阻力特性和线性减振器的研究..... | 18 |
| 货车转向架垂直振动计算.....         | 51 |
| 提高二号车钩强度的研究.....         | 62 |

# 制动装置两风缸压力平衡 过程时间的计算

铁道部天津机车车辆工厂 赵智鹏

## 内 容 提 要

本文分析了铁路机车车辆制动机中常见的一种情况，即利用贮风缸与另一降压气室之间的渐缩节流小孔来控制制动缸压力上升特性，最后达到压力平衡的过程。推导出整个压力平衡过程时间的计算公式。推导中应用了可压缩流的流量公式，把过程分为临界流动和亚临界流动，并设空气流动在气室内是等温变化，在渐缩节流孔中是等熵变化，在不考虑流量系数的条件下求出了平衡过程时间与节流孔面积，风缸容积，风缸起始压力和温度等四项因素的关系。所推导出的公式经过试验证明其准确性能满足计算要求，可直接用来设计、分析、研究制动机。

列车空气制动机的作用过程，系变化各风缸间压力过程，并且利用不同风缸容积和不同的通路面积控制其作用时间，达到预期的制动性能。所以对空气在不同情况下通过小孔径的过程时间计算对制动机的设计和研究都是十分必要的。现在就其中一个问题即两风缸平衡压力过程的时间计算进行讨论。对于每一辆车的制动机来说风缸之间的距离是较近的，所经过的管道亦不长时，同时其管道的过气断面又大于阀内的最小过气断面时，我们可以把空气看成理想气体，在流过最小截面时由于气流速度较高可认为与外界不存在热交换的等熵过程。但在风缸内的空气流动则可近似地看成等温过程。由于我们的计算是基于气体外射流动的原理，为了简化计算即流量系数先设为1，所以气体是经过收缩形喷嘴外射流动的（这流量系数与通常节流计算的流量系数有所不同）。但后面我们还要在试验中碰到这个问题，所以就它的一些现象进行解释。现在主要是推导时间的计算方法，对流量系数的详细讨论还未有条件。经过以上的简化处理后我们就可以着手来推导了。其流动参数如图1所示。

我们可以把原来表示理想气体状态方程化成适合我们计算方便的压力、重量、容积、温度的状态方程为如下形式：

$$PV = GRT$$

式中  $P$ ——空气的压力 ( $\text{kg/cm}^2$ ，绝对压力)；

$V$ ——风缸容积 ( $\text{cm}^3$ )；

$G$ ——风缸空气重量 ( $\text{kg}$ )；

$R$ ——气体常数， $2927\text{kg}\cdot\text{cm/kg}\cdot\text{度}$ ；

$T$ ——空气温度 ( $^{\circ}\text{K}$ )。

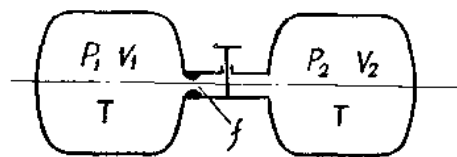


图 1

以上方程表示了当  $V$ 、 $T$ 、 $R$  均为常数时，压力  $P$  与风缸内空气重量成正比关系。如果今后我们的计算都设在  $0^{\circ}\text{C}$  内进行，把其他常量代入上方程和移项后得：

$$G = \frac{VP}{2927 \times 273} = 80 \times 10^4 \frac{PV}{1}$$

从上式可以看出，当风缸内空气流出时， $G$  及  $P$  均下降，流入时则上升。为求出  $G$  和  $P$  的微

小变量的关系, 对上式微分后得:

$$dG = \frac{V}{80 \times 10^4} dP \quad (1)$$

从图1知道,  $V_1$  风缸的起始压力是  $P_1$ , 我们称  $V_1$  是平衡风缸; 另一风缸  $V_2$  称为被平衡风缸, 并设它的起始压力为一个大气压。两风缸之间从短管连接, 同时塞门是在瞬时内突然开放, 由风缸  $V_1$  经小喷嘴  $f$  小截面流向  $V_2$ 。由质量守恒定律可建立下列方程:

$$-dG = Q dt' \quad (2)$$

式中  $Q$ ——重量流量 (kg/秒);

$t'$ ——时间 (秒)。

由 (2) 式知  $V_1$  风缸内有空气流出时, 瞬时流量与时间微元的乘积等于风缸中空气重量的减少值。在计算中由风缸流出取负号, 向风缸流入取正号。

把  $dG$  和  $Q$  值代入 (2) 式并积分后可以求出时间值, 但由热力学知 (如图 1 所示) 当

$$\frac{P}{P_2} \geq 1.89$$

$$\text{时} \quad Q = Q_{kp} = \frac{fP}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{gK}{R} \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K+1}{K-1}}} \quad (3)$$

式中  $P_2$ —— $V_2$  风缸中的瞬时压力 (kg/cm<sup>2</sup>, 绝对压力);

$Q_{kp}$ ——临界重量流量 (kg/秒);

$f$ ——平衡流动的最小面积 (cm<sup>2</sup>);

$K$ ——空气绝热系数=1.4;

$g$ ——重力加速度=980 cm/秒<sup>2</sup>;

$P$ —— $V_1$  风缸中的瞬时压力 (kg/cm<sup>2</sup>, 绝对压力)。

把各常数代入 (3) 式后得:

$$Q_{kp} = 0.0239 f P \quad (4)$$

以后我们把  $\frac{P}{P_2} \geq 1.89$  称为临界流动区。

当  $\frac{P}{P_2} \leq 1.89$

$$\text{时} \quad Q = f P \sqrt{\frac{2Kg}{(K-1)R T} \left[ \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{2}{K}} - \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{K+1}{K-1}} \right]} \quad (5)$$

我们把  $\frac{P}{P_2} \leq 1.89$  这个区域称为亚临界流动区。所以以后我们就分别求出临界流动区和亚临界流动区的时间, 最后求其总和就可求出自开始平衡到平衡終了的时间。

(1) 临界流动区的时间计算

按由平衡风缸流出空气来计算时间把 (1); (4) 两式代入 (2) 式得:

$$-\frac{V}{80 \times 10^4} dP = 0.0239 f P dt'$$

移项后

$$dt' = \frac{V}{1.911 \times 10^4 f} \times \frac{dP}{P} \quad (6)$$

对上式积分限的决定:

由上述知  $V_2$  风缸起始压力为一大气压, 所以平衡后压力可按下列式计算, 即

$$P_{\text{平衡}} = \frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2} \quad (7)$$

式中  $P_{\text{平衡}}$  ——两风缸平衡压力 (kg/cm<sup>2</sup>, 绝对压力);

$V_1$  ——平衡风缸容积 (cm<sup>3</sup>);

$V_2$  ——被平衡风缸容积 (cm<sup>3</sup>);

$P_1$  ——平衡风缸起始压力 (kg/cm<sup>2</sup>, 绝对压力)。

可知: 当  $t' = 0$  时  $P = P_1$ ,

当  $t' = t'_1$  时即临界流动终了时间, 由临界流动条件知,

$$\frac{P}{P_2} = 1.89$$

$P_2$  ——被平衡风缸流动过程时瞬时压力 (kg/cm<sup>2</sup>, 绝对压力)。

由两风缸的压力平衡关系知

$$P_2 = (P_1 - P) \frac{V_1}{V_2} + 1 \quad (8)$$

代入上式后

$$\frac{P}{(P_1 - P) \frac{V_1}{V_2} + 1} = 1.89$$

得当  $t' = t'_1$  时

$$P = \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1}$$

积分限定出后把 (6) 式列成积分式得:

$$\begin{aligned} \int_0^{t'_1} dt' &= - \frac{V_1}{1.911 \times 10^4 f} \int_{P_1}^{\frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1}} \frac{dP}{P} \\ t'_1 &= - \frac{0.523 V_1}{10^4 f} \left( \ln P_1 - \ln \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

以上计算是假设在 0°C 内进行, 如在  $t^\circ\text{C}$  温度下进行, 上式应加入  $\sqrt{\frac{273}{273+t}}$  值。

这时 (9) 式变为如下形式:

$$t'_1 = - \frac{0.523 V_1}{10^4 f} \left( \frac{273}{273+t} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \ln P_1 - \ln \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1} \right) \quad (10)$$

用上式可以计算  $V_1$  风缸整个临界流动区的时间。如果需要计算  $V_1$  风缸自压力  $P_1$  下降到  $P > \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1}$  时, 可按下式计算:

$$t' = - \frac{0.523 V_1}{10^4 f} \left( \frac{273}{273+t} \right)^{\frac{1}{2}} (\ln P_1 - \ln P) \quad (11)$$

(2) 亚临界流动区的时间计算

在临界流动时的时间计算是按空气自  $V_1$  风缸流出计算, 其实在过程时间的计算也可按空气向  $V_2$  风缸流入计算, 其最终结果是一致的。所以在亚临界流动的时间计算, 按向  $V_2$  风缸流入计算。这时  $Q$  应按 (5) 式,

即

$$Q = f P \sqrt{\frac{2Kg}{(K-1)RT}} \left[ \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{2}{K}} - \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{K+1}{K}} \right]$$

同时由 (8) 式可解出  $P$  值得,

$$P = P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \quad (12)$$

与常数一同代入以上流量公式得:

$$Q = 0.092f \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} - \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

因按空气流入  $V_2$  计算, 所以应按 (2) 式建立平衡方程式 (但这时负号取消):

$$dG = Q dt' \quad (2')$$

此时

$$dG = - \frac{V_2}{80 \times 10^4} dP_2$$

都代入 (2') 式后得:

$$\frac{V_2}{80 \times 10^4} dP_2 = 0.092f \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} - \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} \right]^{\frac{1}{2}} dt'$$

分离变数后:

$$dt' = - \frac{V_2}{7.36 \times 10^4 f} dP_2 \left[ \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} - \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

定上式积分限:

当  $t' = 0$  时即亚临界流动开始压力比  $\frac{P}{P_2} = 1.89$ 。

将 (12) 式代入本条件后

$$\frac{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}}{P_2} = 1.89$$

移项后

$$P_2 = \frac{P_1 V_1 + V_2}{1.89 V_1 + V_2}$$

当  $t' = t'_2$  时, 即压力平衡终了亚临界流动完毕, 此时由 (7) 式知:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}$$

把以上的微分方程积分并代入积分上下限后:

$$\int_0^{t'_2} dt' = - \frac{V_2}{7.36 \times 10^4 f} \int_{\frac{P_1 V_1 + V_2}{1.89 V_1 + V_2}}^{\frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}} dP_2 \left[ \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} - \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} \right]^{\frac{1}{2}}$$



简化被积函数:

设  $P_1 + \frac{V_2}{V_1} = a$ ,  $\frac{V_2}{V_1} = b$ , 则积分简化为 (暂时不计算积分限):

$$\begin{aligned} & \int \frac{1}{(a-bP_2) \left[ \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{2}{1.4}} - \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{2.4}{1.4}} \right]^{\frac{1}{2}}} dP_2 \\ &= \int \frac{1}{(a-bP_2) \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{5}{7}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{2}{7}} \right]^{\frac{1}{2}}} dP_2 \end{aligned}$$

作函数更换:

设  $\mu = \frac{P_2}{a-bP_2}$ , 则  $P_2 = \frac{\mu a}{1+b\mu}$ ,

$$dP_2 = \frac{ad\mu}{(1+b\mu)^2}.$$

$$a-bP_2 = \frac{a}{1+b\mu}.$$

代入积分内得:

$$\begin{aligned} & \int \frac{1}{(a-bP_2) \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{5}{7}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{a-bP_2} \right)^{\frac{2}{7}} \right]^{\frac{1}{2}}} dP_2 \\ &= \int \frac{\frac{ad\mu}{(1+b\mu)^2}}{\frac{a}{1+b\mu} \cdot \mu^{\frac{5}{7}} \left( 1 - \mu^{\frac{2}{7}} \right)^{\frac{1}{2}}} = \int \frac{d\mu}{(1+b\mu) \mu^{\frac{5}{7}} \left( 1 - \mu^{\frac{2}{7}} \right)^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

再作变数更换: 设  $\mu = V^7$  则

$$\begin{aligned} & \int \frac{d\mu}{(1+b\mu) \mu^{\frac{5}{7}} \left( 1 - \mu^{\frac{2}{7}} \right)^{\frac{1}{2}}} = \int \frac{7V^6 dV}{(1+bV^7) V^5 (1-V^2)^{\frac{1}{2}}} \\ &= 7 \int \frac{V dV}{(1+bV^7) (1+V^2)^{\frac{1}{2}}} \end{aligned}$$

再作最后一次变数更换:

设  $V = \sin \theta$ ,

得,

$$\begin{aligned} & 7 \int \frac{V dV}{(1+bV^7) (1+V^2)^{\frac{1}{2}}} = 7 \int \frac{\sin \theta \cos \theta d\theta}{(1+b \sin^7 \theta) \cos \theta} \\ &= 7 \int \frac{\sin \theta d\theta}{1+b \sin^7 \theta} \end{aligned}$$

现在计算变数更换后的积分限:

当  $P_2 = \frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}$  (同时将  $a = P_1 + \frac{V_2}{V_1}$ ,  $b = \frac{V_2}{V_1}$  代入) 得

$$\begin{aligned}
\theta &= \sin^{-1} V = \sin^{-1} \mu^{\frac{1}{7}} = \sin^{-1} \left[ \frac{P_2}{a-bP_2} \right]^{\frac{1}{7}} \\
&= \sin^{-1} \left[ \frac{\frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}}{\frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1} - \frac{V_2}{V_1} \left( \frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2} \right)} \right]^{\frac{1}{7}} \\
&= \sin^{-1} 1 = \frac{\pi}{2}
\end{aligned}$$

同理, 当  $P_2 = \frac{P_1 V_1 + V_2}{1.89 V_1 + V_2}$  时, 得:

$$\theta = \sin^{-1} \left[ \frac{1}{1.89} \right]^{\frac{1}{7}} = \sin^{-1} 0.913 = 65^\circ 54' = 65.9 \times \frac{\pi}{180} \text{ 弧度}.$$

故最后得:

$$\begin{aligned}
&\int_{\frac{P_1 V_1 + V_2}{1.89 V_1 + V_2}}^{\frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}} dP_2 \left/ \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left( \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{2}{1.4}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right)^{\frac{2}{1.4}} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\
&= 7 \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{1 + b \sin^7 \theta}
\end{aligned}$$

$$\text{设 } I = \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta d\theta}{1 + b \sin^7 \theta}$$

考察级数

$$\begin{aligned}
\frac{1}{1 + b \sin^7 \theta} &= 1 - b \sin^7 \theta + b^2 \sin^{14} \theta - b^3 \sin^{21} \theta + \dots \\
&\dots + (-1)^n b^n \sin^{7n} \theta + \varphi_n(\theta)
\end{aligned}$$

$$\left[ \text{其中 } \varphi_n(\theta) = (-1)^{n+1} \frac{b^{n+1} \sin^{7(n+1)+1} \theta}{1 + b \sin^7 \theta} \text{ 为级数第 } n \text{ 项以后的余和} \right]$$

这个展式在  $|b| < 1$  及  $|\sin \theta| \leq 1$  的情况下即在区间  $\left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$  内系一致收敛, 故可以逐项积分。故得

$$\begin{aligned}
I &= \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin \theta}{1 + b \sin^7 \theta} d\theta \\
&= \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} (\sin \theta - b \sin^8 \theta + b^2 \sin^{15} \theta + \dots) d\theta
\end{aligned}$$

经过误差估计表明, 级数在  $|b| \leq \frac{1}{2}$  的情况下, 取前三项已达到使用上的精确度, 故:

$$\begin{aligned}
 f &= \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\pi}{180} (1 + b \sin^2 \theta) d\theta \\
 &= \int_{65.9 \times \frac{\pi}{180}}^{\frac{\pi}{2}} (\sin \theta - b \sin^3 \theta + b^2 \sin^5 \theta) d\theta = (0.4083 - 0.338b + 0.2865b^2) \cdot \\
 \text{故 } \int_{\frac{P_1 V_1 + V_2}{1.89 V_1 + V_2}}^{\frac{P_1 V_1 + V_2}{V_1 + V_2}} dP_2 &= \left( P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{1.4} \right. \\
 &\quad \left. - \left( \frac{P_2}{P_1 - P_2 \frac{V_2}{V_1} + \frac{V_2}{V_1}} \right)^{2.4} \right]^{\frac{1}{2}} \\
 &= 7 (0.4083 - 0.338 \frac{V_2}{V_1} + 0.2865 \frac{V_2^2}{V_1^2}) \quad (\text{把 } b = \frac{V_2}{V_1} \text{ 代入})
 \end{aligned}$$

把积分值代入原时间积分式:

$$t'_2 = \frac{V_2}{1.051 \times 10^4 f} (0.4083 - 0.338 \frac{V_2}{V_1} + 0.2865 \frac{V_2^2}{V_1^2}) \quad (13)$$

加入温度修正值后:

$$t'_2 = \frac{V_2}{1.051 \times 10^4 f} \left( \frac{273}{273 + t} \right)^{\frac{1}{2}} (0.4083 - 0.338 \frac{V_2}{V_1} + 0.2865 \frac{V_2^2}{V_1^2}) \quad (14)$$

由上式知亚临界流动过程时间计算值与容积比、容积大小和流过截面积  $f$  等有关, 与起始压力无关。(14)式只给出了在亚临界流动的整个过程时间, 但若起始压力不等于临界压力比或计算  $V_2$  风缸压力还未达到平衡压力时, 只好在已知的压力区间, 重复以上定上下限方法并重新积分。又如果求其在  $V_2$  风缸的  $\frac{dP_2}{dt'}$  或  $V_1$  风缸的  $\frac{dP}{dt'}$  那只好利用以上原理加以引伸, 在这不作讨论。一般说来计算其整个平衡过程时间还是主要的。

(3) 临界流动与亚临界流动的时间和:

$$t' = t'_1 + t'_2$$

把 (10) 式 (14) 式代入上式得

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{1}{10^4 f} \left( \frac{273}{273 + t} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 0.523 V_1 (\ln P_1 - \ln \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1}) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{V_2}{1.051} (0.4083 - 0.338 \frac{V_2}{V_1} + 0.2865 \frac{V_2^2}{V_1^2}) \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

公式推导到此已全部完毕, 两风缸压力开始平衡到平衡终了的总时间计算已如 (15) 式所示。

(4) 计算数值与实验的比较

用图 1 所示的简单设备在  $V_1 = 12.4$  升及  $V_2 = 5.6$  升的情况下, 试验了三种不同孔径及它在三种不同的  $P_1$  值下的平衡时间及其两风缸的升降压图表 (如图 2 所示)。

由于试验所用孔径较小, 制造成渐缩形喷嘴其过渡圆弧难于精确, 故采用了磨制孔板, 这样由于出口是锐缘, 流股流过后产生收缩出现了流量系数。

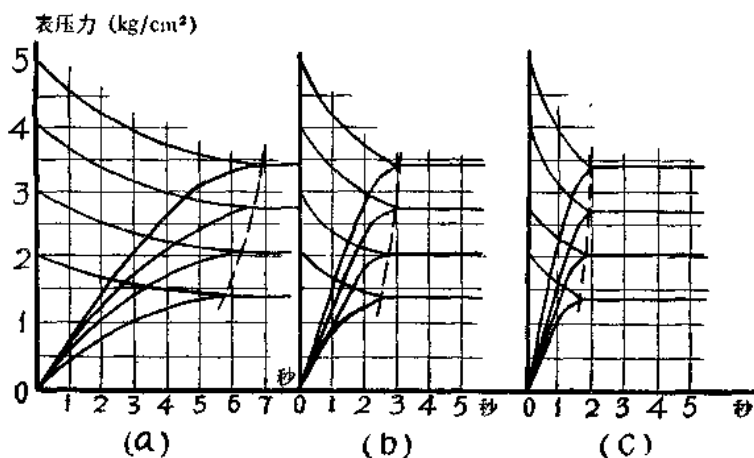


图2. 在不同孔径下风缸压力平衡过程的时间曲线 ( $V_1=12.4$ 升,  $V_2=5.6$ 升,  $t=18^\circ\text{C}$ )

(a) ——当孔板孔径为 $\phi 2.2$ mm时; (b) ——当孔板孔径为 $\phi 3.3$ mm时;

(c) ——当孔板孔径为 $\phi 4.15$ mm时。

由 (15) 式知

$$t'_2 = \frac{1}{10^4 f} \left( \frac{273}{273+t} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ 0.523 V_1 (\ln P_1 - \ln \frac{1.89 P_1 V_1 + 1.89 V_2}{V_2 + 1.89 V_1}) + \frac{V_2}{1.051} (0.4083 - 0.338 \frac{V_2}{V_1} + 0.2865 \frac{V_2^2}{V_1^2}) \right]$$

当室温  $18^\circ\text{C}$   $\therefore \left( \frac{273}{273+t} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.97$

$V_1=12.4$ 升 $=12400\text{cm}^3$ ,  $V_2=5.6$ 升 $=5600\text{cm}^3$ 。

$P_1$ 分别等于6、5、4及孔径分别为 $\phi 4.15$ 、 $\phi 3.3$ 、 $\phi 2.2$ 毫米时, 上式计算可用下表概括:

|                                   | $\ln P_1$        | $\ln \frac{1.89P_1V_1+1.89V_2}{V_2+1.89V_1}$ | $t'$ (計算)秒      |                              |                        | $t'$ (实测)秒             |                             |                     |
|-----------------------------------|------------------|----------------------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|
|                                   |                  |                                              | $\phi 4.15$     | $\phi 3.3$                   | $\phi 2.2$             | $\phi 4.15$            | $\phi 3.3$                  | $\phi 2.2$          |
| $P_1=6$                           | 1.7918           | $\ln 5.21=1.6500$                            | 2.00            | 3.15                         | 7.10                   | 2.6                    | 3.2                         | 7                   |
| $P_1=5$                           | 1.6094           | $\ln 4.4=1.4816$                             | 1.93            | 3.05                         | 6.86                   | 2.2                    | 3.1                         | 6.8                 |
| $P_1=4$                           | 1.3864           | $\ln 3.59=1.2782$                            | 1.84            | 2.90                         | 6.54                   | 2                      | 2.82                        | 6.5                 |
|                                   |                  | $\phi 4.15$                                  | $\phi 3.3$      | $\phi 2.2$                   | $0.523\frac{V_2}{V_1}$ | $0.338\frac{V_2}{V_1}$ | $0.2865\frac{V_2^2}{V_1^2}$ | $\frac{V_2}{1.051}$ |
| $\frac{1}{10^4f} (1/\text{cm}^2)$ | $\frac{1}{1352}$ | $\frac{1}{855}$                              | $\frac{1}{330}$ | $V_1=12400$<br>$\text{cm}^3$ | 6490                   |                        |                             |                     |
|                                   |                  |                                              |                 | $V_2=5600$<br>$\text{cm}^3$  |                        | 0.1524                 | 0.06875                     |                     |
|                                   |                  |                                              |                 |                              |                        |                        |                             | 5325                |

通过上表的平衡, 总时间的计算值和实测值可得如图3的规律。

(5) 几点讨论:

(一) 从图3可看出计算值与实测值的关系: 如果将公式(15)中的 $f$ 值(面积)作为时间的函数, 而其他都可用一常数 $A$ 为代表, 得 $t' = \frac{A}{a^2}$ , 所以图3中的实线成如上式的关系, 而虚线则在直径愈大时误差愈大。其原因可从下一点讨论中得到解释。

(二) 流量系数的大小是直接影响流量的参数。流量系数大则流量大, 流量系数小则流

量降低。对于我们来说流量增加意味着时间的缩短，流量减少则时间增长。流量系数应该是实际孔形的流量与收缩形喷嘴的流量之比，但收缩形喷嘴的流量系数又十分近于1，所以说流量系数是实际孔形的流量与理论流量之比。又如大家所熟知，流量系数是与孔板前后压力比有关，即压力比愈大流量系数愈小，这是在一定的孔径下来说的。但如在同一压力比下，则孔径愈大流量系数下降愈大。由实验得出，由于这种流动是非定常流，流量系数随着压力比的变化而变化。由于种种原因，流量系数不是本文的主要解决内容，还有待今后大量实验和研究。

(三) 当过气的最小截面  $f$  和  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $t$  为定值时，由 (14) 式知其亚临界流动的过程时间  $t'$  与  $P_1$  值无关，即不管平衡起始压力的高低，亚临界流动过程时间为一常数（在不考虑流量系数的情况下）。

(四) 在使用公式 (15) 时，应注意在推导这公式的先决条件是  $V_2$  的起始压力为一大气压， $V_1$  的起始压力  $P_1 > 1.89$  大气压，在推导过程中判别级数收敛时的条件是  $\frac{V_2}{V_1} < 1$ ，也就是说只能应用在  $V_1 > V_2$  而不能用在  $V_2 > V_1$ 。当然在制动机的使用情况下绝大部分都是由大风缸向小风缸平衡的。最后还应该指出的是这种计算不能用于副风缸向制动缸充气的过程。

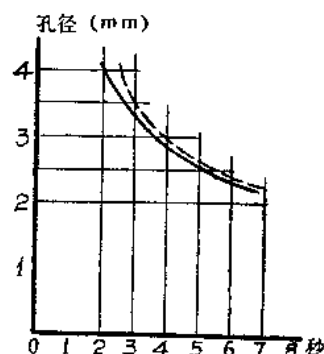


图3. 在相同压力比但不同孔径下平衡了时间图

——实验数值；  
——根据公式计算值。

# 实制动时间与实制动距离计算公式的简化

铁道科学研究院 張振鵬

## 內 容 提 要

本文以閼瓦摩擦系数为常数的假定,导出实制动时间与实制动距离的简化计算公式,并根据力学原理分别导出了计算实制动时间与实制动距离用的当量摩擦系数 $\varphi_{kt}$ 与 $\varphi_{ks}$ 和阻力当量 $\omega_t$ 与 $\omega_s$ 。又用实例証实了简化计算公式完全可靠无误。

目前国内采用的制动时间与制动距离的计算公式为:

$$T = t_n + \sum \frac{30(V_2 - V_1)}{1000\varphi_p\varphi_{kp} + \omega_o + i}$$

$$S = \frac{V}{3.6} t_n + \sum \frac{4.17(V_2^2 - V_1^2)}{1000\varphi_p\varphi_{kp} + \omega_o + i}$$

式中:

$V$  —— 制动开始时速度, 公里/小时;

$t_n$  —— 空走时间, 秒;

$\varphi_p$  —— 换算列车制动率 (换算制动系数);

$\varphi_{kp}$  —— 换算摩擦系数;

$\omega_o$  —— 列车平道上阻力, 公斤/吨;

$i$  —— 线路阻力 (曲线与坡道阻力);

$V_2 - V_1$  —— 小阶段的速度变化, 常采用10公里/小时。

以上两式中  $\sum \frac{30(V_2 - V_1)}{1000\varphi_p\varphi_{kp} + \omega_o + i}$  和  $\sum \frac{4.17(V_2^2 - V_1^2)}{1000\varphi_p\varphi_{kp} + \omega_o + i}$  即所谓实制动时间和实制动

距离, 由于该两公式中采用了小阶段速度变化的累积值, 因之计算就变得十分复杂和麻烦, 如果制动开始时速度为116公里/小时, 那么计算实制动时间和实制动距离就得分成12个阶段去计算, 即需计算 (116—100) (110—100) …… (20—10) (10—0) 等各小阶段内的制动时间和制动距离, 而后再累积这12阶段内的数值而得总的实制动时间和实制动距离, 当然在这12个阶段内计算上的误差或错误都将会影响到最后的结果。由此可见, 这种计算方法既麻烦又复杂, 而且发生误差的可能性也大, 因之一般在计算制动距离时采用作图法, 然而作图法的麻烦也很大, 要一定的工具, 同时作图太小误差将更大, 为了更方便地计算实制动时间与实制动距离, 简化计算过程, 提出下面新的公式。

## I 实制动时间计算公式的简化

众所周知, 如不考虑制动时的阻力, 则由纯制动力产生的车辆减速度为:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{B_T}{Q} = 127 \frac{B_T}{Q} = 127b_z \quad (1)$$

式中  $\frac{dV}{dt}$  ——列车制动中的减速度 (公里/小时/小时) ;  
 $B_T$  ——制动力 (公斤) ;  
 $Q$  ——列车重量 (吨) ;  
 $g$  ——重力加速度 (公里/小时/小时) ;  
 $b_z$  ——列车单位重量内的制动力 (公斤/吨) 。

考虑列车轮迴转惯性力的影响。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{127}{1+r} b_z \quad (2)$$

一般在车辆上  $r$  可采用 0.06 因之

$$\frac{dV}{dt} = 120b_z = 120(1000\varphi_K) \quad (3)$$

式中  $\varphi$  ——列车的制动率;  
 $\varphi_K$  ——闸瓦的摩擦系数。

由公式 3 得

$$dt = \frac{dV}{120b_z} = \frac{dV}{120(1000\varphi_K)} \quad (4)$$

$$\int_0^{t_d} dt = \int_0^V \frac{dV}{120(1000\varphi_K)} \quad (5)$$

$\varphi_K$  是  $V$  的函数, 所以在计算中一般采用近似积分法

$$\begin{aligned} t_d &= \sum \Delta t = \sum \frac{V_2 - V_1}{120(1000\varphi_K)} \text{ 时} \\ &= \sum \frac{30(V_2 - V_1)}{1000\varphi_K} \text{ 秒} \end{aligned} \quad (6)$$

这就是目前实制动时间计算公式的来源, 由于  $\varphi_K$  是速度的函数, 也就是在制动过程中是变化着的, 速度愈小此值愈大, 为此在计算时不得不采用近似积分法, 要是假设此摩擦系数为常数, 也就是说在制动过程中不随速度变化而变化, 而只与制动开始时速度有关, 同时以  $\varphi_{K1}$  来表示这一系数, 则公式 4 可以变成:

$$dt = \frac{dV}{120(1000\varphi_{K1})} \quad (7)$$

现在由于  $\varphi_{K1}$  与制动过程中速度变化无关, 因之直接积分后得

$$\int_0^{t_d} dt = \int_0^V \frac{dV}{120(1000\varphi_{K1})} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{V}{120(1000\varphi_{K1})} \text{ 时} \\ &= \frac{30V}{1000\varphi_{K1}} \end{aligned} \quad (9)$$

我们只要设法找出  $\varphi_{K1}$  值, 实制动时间计算公式就可以简化成公式 (9)。 $\varphi_{K1}$  与  $\varphi_K$  有一定的关系, 公式 9 与公式 6 应有相同的结果, 尽管公式形式不同, 然而制动时间计算结果

①  $K$  表示与闸瓦压力有关,  $t$  表示制动时间计算用。

应该是相等的, 这样,

$$\begin{aligned}\int_0^V \frac{dV}{120(1000 + \varphi_{kt})} &= \int_0^V \frac{dV}{120(1000 + \varphi_k)} \\ \int_0^V \frac{dV}{\varphi_k} &= \frac{V}{\varphi_{kt}} \\ \varphi_{kt} &= \frac{V}{\int_0^V \frac{dV}{\varphi_k}}\end{aligned}\quad (10)$$

$$\varphi_k = 0.6 \frac{16K + 100}{80K + 100} \frac{V + 100}{5V + 100}$$

代入公式10得:

$$\varphi_{kt} = \frac{0.6 \frac{16K + 100}{80K + 100} V}{\int_0^V \frac{5V + 100}{V + 100} dV} \quad (11)$$

积分后得

$$\varphi_{kt} = \frac{0.6 \frac{16K + 100}{80K + 100} V}{5V - 400 \ln \frac{V + 100}{100}} \quad (12)$$

目前国内计算制动时间与制动距离都采用  $K = 1.75$  吨作换算标准, 因之如用  $\varphi_{kpt}$  来表示  $K = 1.75$  吨的  $\varphi_{kt}$ , 则

$$\begin{aligned}\varphi_{kpt} &= \frac{0.32V}{\int_0^V \frac{5V + 100}{V + 100} dV} \\ &= \frac{0.32V}{5V - 400 \ln \left( \frac{V + 100}{100} \right)}\end{aligned}\quad (13)$$

各种速度下  $\varphi_{kp}$  与  $\varphi_{kpt}$  值

表 1

| V               | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90    | 100   | 110   | 120   |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\varphi_{kp}$  | 0.234 | 0.193 | 0.166 | 0.150 | 0.137 | 0.128 | 0.121 | 0.115 | 0.111 | 0.107 | 0.104 | 0.101 |
| $\varphi_{kpt}$ | 0.269 | 0.237 | 0.213 | 0.197 | 0.182 | 0.171 | 0.162 | 0.155 | 0.149 | 0.143 | 0.139 | 0.135 |

由于  $\varphi_{kp}$  公式的使用范围是120公里/小时以下, 因之公式13也只能使用于120公里/小时速度以内。

公式12及13在记忆上及计算上都比较不便, 为了便于计算及记忆可以采用如下的公式:

$$\varphi_{kt} = 1.33 \times 0.6 \frac{16K + 100}{80K + 100} \frac{V + 100}{5V + 100} \quad (14)$$

$$\varphi_{kpt} = 1.33 \times 0.32 \frac{V + 100}{5V + 100} \quad (15)$$

以上两公式只是在  $\varphi_k$  与  $\varphi_{kp}$  之前加上系数1.33, 不过该公式只能在50~120公里/小时速度使用, 低于50公里/小时时的  $\varphi_{kt}$  还得按照公式12及13。

$\varphi_{kpt}$  或  $\varphi_{kt}$  实际上是一种当量, 这个当量只能用于计算制动时间而不能用于别处,  $\varphi_{kt}$  可以称谓制动时间计算摩擦系数当量, 而  $\varphi_{kpt}$  则谓制动时间换算摩擦系数当量。



为了便于计算在图 1 中绘制了各种速度下此当量的曲线:

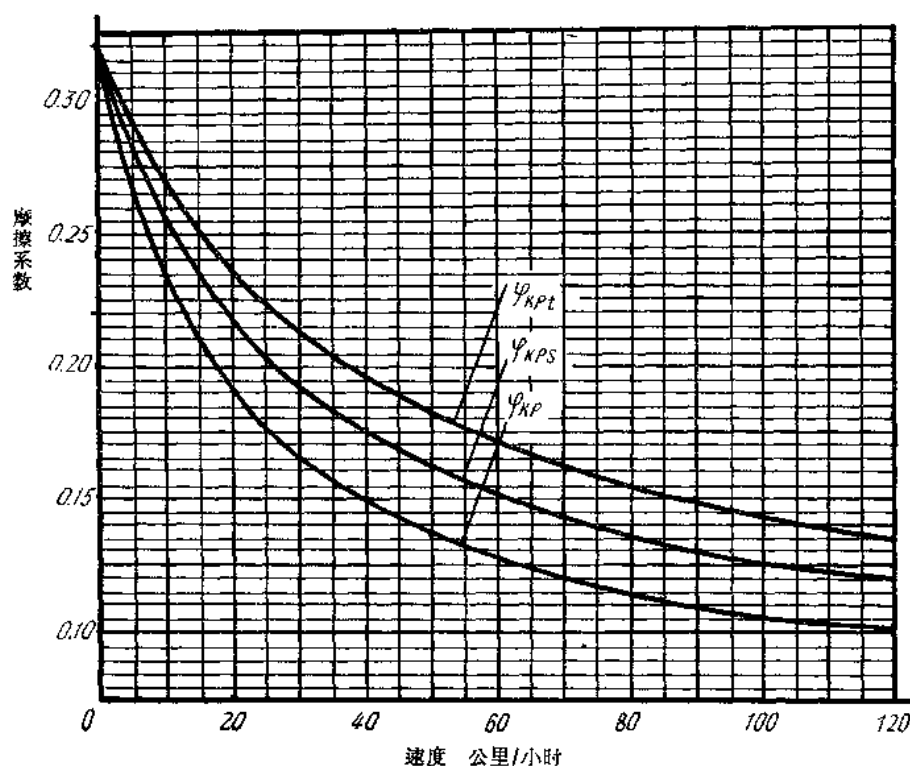


图 1

以上在制动过程中我们没有考虑列车的阻力与线路的阻力。众所周知，列车阻力与制动力是类似的，也是一个速度的函数，这样在简化计算中同样要经过一番换算，即：

$$\omega_z = \frac{V}{\int_0^V \frac{dV}{\omega_0}} \quad (16)$$

$\omega_z$ 也是一种当量，可称谓制动时间计算阻力当量，由于列车阻力与列车编组情况，与车型、自重、载重、季候、风速、风向等因素有关系，故不同类型的列车有不同的列车阻力公式。根据不同的列车阻力公式所求得之  $\omega_z$  接近于  $0.85 \sim 0.7\omega_0$  之间，同时考虑到列车阻力误差在制动过程中占制动力的比重很小，为了计算上方便建议  $\omega_z$  采用  $0.75\omega_0$ ，即  $\omega_z = 0.75\omega_0$ 。

线路阻力与列车速度没有关系，无需经过换算而直接计入。这样简化后的实制动时间计算公式为：

$$\begin{aligned} t_{\theta} &= \frac{30V}{1000\varphi_{kp} + 0.75\omega_0 + i} \text{秒} \\ &= \frac{30V}{1000\varphi_{kp} + 0.75\omega_0 + i} \text{秒} \end{aligned} \quad (17)$$

应用以上的简化公式来计算实制动时间要比用目前使用的公式方便得多，而且计算结果也是十分正确的。

例：令列车换算制动率  $\varphi_p = 0.24$ ，制动地点坡道及曲线阻力为  $i = -10\%$ ，列车阻力设为  $\omega_0 = 0.16 + 0.021V + 0.000021V^2$ 。则用简化公式和现行公式计算实制动时间可以得到相同的结果。