

对井下调节风窗面积计算公式的分析

储重苏 张同美 胡卫民

焦作矿业学院

一九七八年十二月

对井下调节风窗面积计算公式的分析

焦作矿院通风教研室 储重苏 张同美 胡卫民

矿井通风,必须随着井下各工作地点生产情况的变化,及时调节风量,以满足各生产地点所需要的力量。所以说井下风量调节,是通风工作的日常主要任务之一。而井下局部地区的风量调节,尤其是采区内工作面与工作面之间的风量调节,其主要手段就是在阻力较小的一侧加设调节风窗,提高该巷道内的阻力,来达到调节风量的目的。我们分析现用调节风窗面积计算公式后,认为用此公式计算出的结果,存在一定的误差。我们利用精确公式计算并绘制出曲线图,使用时,只需知道风窗所需损耗的风阻 $R_{窗}$ 值,即可由图中相应的曲线上直接查出风窗的精确面积 $S_{窗}$ 值,无需进行烦琐的计算,使用起来十分方便。

本文是根据黄元平同志提出的概念并在他的指导下写成的,顺此向他表示谢意。

一、造成现用调节风窗面积计算公式误差的原因分析

如图 1 所示,风流通过风窗前,首先由巷道断面 S 缩小到风窗断面 $S_{窗}$,通过风窗后,

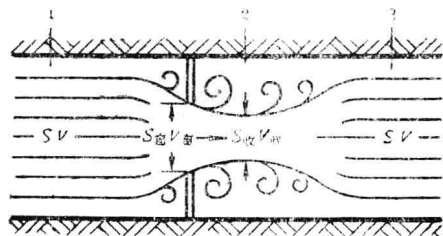


图 1

风流继续收缩到最小断面 $S_{收}$,然后突然扩大到巷道断面 S 。所以说风流通过风窗所造成的损失应包括两部分:风流通过风窗之前的突然收缩的局部阻力损失和风流通过风窗以后的突然扩大的局部阻力损失。

然而现用调节风窗面积计算公式,是基于下述情况下推导出来的,即将风流通过风窗之前的突然收缩损失视为零,只考虑通过风窗以后突然扩大的冲击损失。如图 1 所

示,风流通过风窗 $S_{窗}$ 收缩到最小断面 $S_{收}$ 以后,突然扩大到巷道断面 S 所造成的冲击损失。根据水力学中推导,此项损失可用下式计算:

$$h_{窗} = \frac{(V_{收} - V)^2}{2g} r \quad \text{毫米水柱} \quad [1.166 \sim 167] \quad (1) \quad (\text{注})$$

式中: $V_{收}$ ——风流通过风窗后在收缩最小断面处的平均风速米/秒;
 V ——巷道内的平均风速米/秒;
 g ——重力加速度,等于 9.8 米/秒^2 ;
 r ——空气重率公斤/米³。

[注]:在括号中,逗号前的数为参考书的序号,逗号后的数为该参考书的页号,下同。

前人实验得出, 风流通过风窗时速度变化具有如下比例关系:

$$\frac{V_{\text{收}} - V}{V_{\text{窗}} - V} = 1.6 \sim 1.8 \approx 1.7 \quad [2.7 - 4] \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: $V_{\text{窗}}$ ——风流在风窗断面上的平均风速米/秒;

由(2)式得:

$$V_{\text{收}} - V = 1.7 (V_{\text{窗}} - V) = 1.7 \left(\frac{Q}{S_{\text{窗}}} - \frac{Q}{S} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

将(3)式代入(1)式, 并取 $r = 1.2$ 公斤/米³得:

$$h_{\text{窗}} = \frac{\left[1.7 \left(\frac{Q}{S_{\text{窗}}} - \frac{Q}{S} \right) \right]^2}{2 \times 9.8} \times 1.2 \quad \text{毫米水柱}$$

将上式化简得:

$$S_{\text{窗}} = \frac{Q S}{Q + 2.38 S \sqrt{h_{\text{窗}}}} \text{米}^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{或} \quad S_{\text{窗}} = \frac{S}{1 + 2.38 S \sqrt{R_{\text{窗}}}} \text{米}^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: Q ——安设风窗的巷道所需通过的风量、米³/秒;

S ——安设风窗的巷道的断面积、米²;

$S_{\text{窗}}$ ——调节风窗的面积、米²;

$R_{\text{窗}}$ ——风窗的风阻值、千缪。

很显然, 上式是在忽略突然缩小的损失的前提下, 只考虑风流通过风窗后突然扩大的冲击损失推导出来的。这就是造成现用调节风窗面积计算公式误差的原因。

二、井下调节风窗面积精确计算公式的理论依据及其应用

1、精确计算式的理论推导

如前所述, 图1中风流通过调节风窗所造成的损失 $h_{\text{窗}}$ (毫米水柱) 是由两部分局部阻力损失组成: 即1—2段的突然收缩所造成的局部阻力 $h_{\text{收缩}}$ (毫米水柱)、和2—3段的突然扩大的局部阻力损失 $h_{\text{扩大}}$ (毫米水柱)。

$$\text{即} \quad h_{\text{窗}} = h_{\text{收缩} 1-2} + h_{\text{扩大} 2-3} \quad \text{毫米水柱} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{而} \quad h_{\text{收缩}} = \xi_{\text{收}} \frac{V_{\text{收}}^2}{2 \cdot g} r \quad \text{毫米水柱}$$

$$h_{\text{扩大}} = \frac{(V_{\text{收}} - V)^2}{2 \cdot g} r \quad \text{毫米水柱}$$

将此二式代入 (6) 式得:

$$h_{\text{窗}} = \xi_{\text{收}} \frac{V_{\text{收}}^2}{2 \cdot g} r + \frac{(V_{\text{收}} - V)^2}{2 \cdot g} r \quad \text{毫米水柱} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: $\xi_{\text{收}}$ ——突然收缩局部阻力系数, $\xi_{\text{收}}$ 是近似等于 0.06 的一个常数, 现证明如下:

如图 1 所示:

按实际流体考虑时, 可列出下列方程式:

$$\begin{aligned} h_{\text{收缩}} &= (p_{\text{静}1} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} r_1) - (p_{\text{静收}} + \frac{V_{\text{收}}^2}{2 \cdot g} r_{\text{收}}) \\ &= \xi_{\text{收}} \frac{V_{\text{收}}^2}{2 \cdot g} r_{\text{收}} \quad \text{毫米水柱} \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

式中: $p_{\text{静}1}$ ——为巷道 1 断面上的绝对静压, 毫米水柱;
 $p_{\text{静收}}$ ——为风流通过风窗后收缩最小断面 2 上的绝对静压, 毫米水柱;
 V_1 ——巷道断面 1 上的平均风速, 米/秒;
 $V_{\text{收}}$ ——风流通过风窗后的最小收缩断面 2 上的平均风速, 米/秒;
 $r_1 r_{\text{收}}$ ——为断面 1 和断面 2 上的空气重率, 公斤/米³;

令 $B = p_{\text{静}1} - p_{\text{静收}} + \frac{V_1^2}{2g} r$ 毫米水柱 并代入 (8) 式得:

$$B = (\xi_{\text{收}} + 1) \frac{V_{\text{收}}^2}{2g} r_{\text{收}}$$

$$\therefore V_{\text{收}} = \sqrt{\frac{2g B}{(\xi_{\text{收}} + 1) r_{\text{收}}}} = \frac{1}{\sqrt{(\xi_{\text{收}} + 1)}} \sqrt{\frac{2g B}{r_{\text{收}}}} = \varphi \sqrt{\frac{2g B}{r_{\text{收}}}} \quad \text{米/秒}$$

$$\text{即: } \varphi = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{收}} + 1}} = \frac{V_{\text{收}}}{\sqrt{\frac{2g B}{r_{\text{收}}}}}$$

式中: φ ——流速系数, 就是收缩断面处的实际流体速度与理想流体速度之比。

按理想流体考虑时, $h_{\text{收缩}} = 0$, 即断面 1 的全能量等于断面 2 的全能量, 故可列方程式如下:

$$p_{\text{静}1} + \frac{V_1^2}{2g} r_1 = p_{\text{静收}} + \frac{V_{\text{收}}'^2}{2g} r_{\text{收}}$$

式中: $V_{\text{收}}'$ ——在理想流体情况下, 在最小收缩断面 2 处的平均风速, 米/秒。

其它符号同前。

$$\text{令 } B = p_{\text{静}1} - p_{\text{静收}} + \frac{V_1^2}{2g} r_1 = \frac{V_{\text{收}}^2}{2g} r_{\text{收}}$$

$$\text{故 } V_{\text{收}} = \sqrt{\frac{2gB}{r_{\text{收}}}} \quad \text{米/秒}$$

$$\therefore \varphi = \frac{V_{\text{收}}}{V_{\text{收}}} \quad \text{前人实验[1.219]得}$$

$$\varphi = 0.97 \sim 0.98 \approx 0.97$$

$$\text{则 } \xi_{\text{收}} + 1 = \frac{1}{\varphi^2}, \quad \xi_{\text{收}} = \frac{1}{\varphi^2} - 1 = \frac{1}{0.97^2} - 1 \approx 0.06$$

$$\text{又(2)式 } \frac{V_{\text{收}} - V}{V_{\text{窗}} - V} = 1.6 \sim 1.8 \approx 1.7$$

$$\text{故 } V_{\text{收}} - V = 1.7(V_{\text{窗}} - V) \quad \text{米/秒}$$

$$V_{\text{收}} = 1.7(V_{\text{窗}} - V) + V = 1.7V_{\text{窗}} - 0.7V \quad \text{米/秒}$$

代入(7)式得

$$h_{\text{窗}} = 0.06 \frac{(1.7V_{\text{窗}} - 0.7V)^2}{2g} r + \frac{[1.7(V_{\text{窗}} - V)]^2}{2g} r \quad \text{毫米水柱}$$

将 $V_{\text{窗}} = \frac{Q}{S_{\text{窗}}}$ 米/秒, $V = \frac{Q}{S}$ 米/秒, 代入上式并简化得:

$$\frac{2gh_{\text{窗}} \cdot S^2}{rQ^2} S_{\text{窗}}^2 - 2.919S_{\text{窗}}^2 + 5.923S_{\text{窗}} \cdot S - 3.063S^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{令 } a = \frac{2gh_{\text{窗}} \cdot S^2}{rQ^2} = \frac{19.6h_{\text{窗}} S^2}{rQ^2} = \frac{19.6 \cdot S^2}{r} R_{\text{窗}}$$

$$b = 2.919 \approx 2.92$$

$$c = 5.923S$$

$$d = 3.063S^2 \approx 3.06S^2$$

故(8)式化简为下列形式

$$(a-b) S_{\text{窗}}^2 + CS_{\text{窗}} - d = 0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

(9)式的验证: 当 $h_{\text{窗}} = 0$, 即 $R_{\text{窗}} = 0$, 则 $a = 0$, $S_{\text{窗}} = S$ 米², 故(9)式变为

下列形式:

$$-bS^2 + CS - d = 0$$

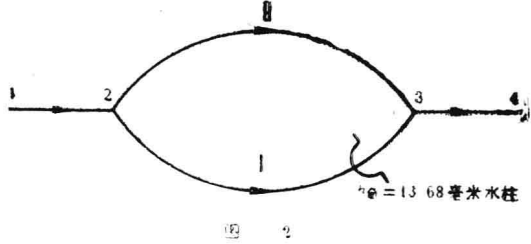
将各数值代入得

$-2.92S^2 + 5.923S^2 - 3.06S^2 = 0$ 此式结果近似为零, 所以说明上式是合理的, 理论上推导是正确的。

2、精确式和现用公式的比较

现通过下述实例计算来看两式的优缺点。

举例: 以图 2 所示, 已知通过 I、II 工作面风量 $Q = 12 \text{ 米}^3/\text{秒}$, 空气重率 $r = 1.2 \text{ 公斤}/\text{米}^3$, 各巷道的断面积 $S = 4 \text{ 米}^2$, 通过计算需只在 I 井工作面回风道中安设调节风窗, 已知风窗所需损耗的风压 $h_{\text{窗}} = 10 \text{ 毫米水柱}$, 求 $S_{\text{窗}} = ?$



(1) 用精确式计算

$$a = \frac{2gh_{\text{窗}} \cdot S^2}{r \cdot Q^2} = \frac{2 \times 9.80 \times 4^2 h_{\text{窗}}}{1.2 \times 12^2} = \frac{313.6}{172.8} h_{\text{窗}} = 1.82 h_{\text{窗}} = 1.82 \times 10 = 18.2$$

$$b = 2.92$$

$$c = 5.923 \times S = 5.923 \times 4 = 23.69$$

$$d = 3.063 \times S^2 = 3.063 \times 4^2 = 49.014$$

将上述各值代入 (9) 式得

$$(18.2 - 2.92) S_{\text{窗}}^2 + 23.69 S_{\text{窗}} - 49.01 = 0$$

$$15.28 S_{\text{窗}}^2 + 23.69 S_{\text{窗}} - 49.01 = 0$$

利用公式
$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

得
$$S_{\text{窗}} = \frac{-23.69 \pm \sqrt{(23.69)^2 - 4 \times 15.28(-49.01)}}{2 \times 15.28} = \frac{-23.69 \pm 59.68}{30.56}$$

$$S_{\text{窗}} = \frac{-23.69 - 59.68}{30.56} = \frac{-83.37}{30.56} = -2.73 \text{ 米}^2 \quad \text{无意义, 故舍去。}$$

$$S_{\text{窗}} = \frac{-23.69 + 59.68}{30.56} = \frac{35.99}{30.56} = 1.178 \text{ 米}^2$$

(2) 以现用公式计算

$$S_{窗}^{\prime} = \frac{Q \cdot S}{Q + 2.38 \times S \sqrt{h_{窗}}} \text{ 米}^2 = \frac{12 \times 4}{12 + 2.38 \times 4 \times \sqrt{10}} = 1.138 \text{ 米}^2$$

$$S_{窗} - S_{窗}^{\prime} = 1.178 - 1.138 = 0.04 \text{ 米}^2$$

以上计算表明：现用计算公式有时误差较大，但精确式计算较麻烦。

(3) 精确式的 $\sqrt{R_{窗}} \sim S_{窗}$ 坐标图的绘制及其应用

为了简便计算，我们通过精确式计算，绘制出 $\sqrt{R_{窗}} \sim S_{窗}$ 曲线图，因此，使用时只需知道风窗的风阻 $R_{窗}$ (千缪) 值和风窗所在巷道的断面积 S (米²)，即可由相应的曲线中直接查出风窗的精确面积 $S_{窗}$ 值，使用起来，十分方便，而无需进行烦琐的计算。

$\sqrt{R_{窗}} \sim S_{窗}$ 曲线图的绘制法：

以上例为据，当安设风窗的巷道面积为 $S = 4 \text{ 米}^2$ ，通过该巷道的风量 $Q = 12 \text{ 米}^3/\text{秒}$ ，空气重率 $\tau = 1.2 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ 时，在不同的 $R_{窗}$ (或 $h_{窗}$) 值的情况下，用现用公式和精确式分别进行计算，将计算结果列成表，如表所示。以表中的 $\sqrt{R_{窗}}$ 为横座标， $S_{窗}$ 为纵座标，

当 $S = 4 \text{ 米}^2$ $\tau = 1.2 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ 时	风窗面积 已知 的 $\sqrt{R_{窗}}$ 值 (千缪) ^{1/2}	用近似式 计算出的 $S_{窗}^{\prime}$ (米 ²)	用精确式 计算出的 $S_{窗}$ (米 ²)	两式计算 之差 $\Delta S_{窗}$ (米 ²)	附 注
	(米 ²)				
	0.186	1.44	1.485	0.045	
	0.2629	1.14	1.178	0.038	
	0.3728	0.88	0.908	0.03	
	0.455	0.75	0.798	0.048	
	0.5196	0.664	0.687	0.023	
	0.5874	0.604	0.624	0.020	
	0.648	0.557	0.577	0.020	
	0.693	0.523	0.538	0.015	
	0.742	0.495	0.507	0.012	
	0.788	0.47	0.48	0.010	

将表中的各对应的 $\sqrt{R_{窗}}$ 和 $S_{窗}$ 值描出对应的点，将这些点联接起来，即可描绘出图 3 中所示的巷道断面积 $S = 4 \text{ 米}^2$ 时的曲线。同理可以作出 $S = 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 12 \dots \text{米}^2$ 的各条曲线。这些曲线是在 $\tau = 1.2 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ 的条件下作出的。在同一断面 S 的条件下， τ 不同，则有不同的曲线，当 $t = 20^\circ \text{C}$ 时， $\tau = 1.23 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ ； $t = 30^\circ \text{C}$ 时， $\tau = 1.161 \text{ 公斤}/\text{米}^3$ ，

可作此条件下的两条曲线，但这两条曲线和 $\bar{r}=1.2$ 公斤/米³时的曲线相差甚微，图中不便于表示，故未画出。

$\sqrt{R_{\text{窗}}} \sim S_{\text{窗}}$ 曲线图的应用

举例：(1) 已知安设风窗的巷道的断面 $S=4$ 米²， $\bar{r}=1.2$ 公斤/米³， $R_{\text{窗}}=0.16$ 千缪，求风窗面积 $S_{\text{窗}}$ 的大小。

解：根据图 3

$\sqrt{R_{\text{窗}}} = \sqrt{0.16} = 0.4$ (千缪) ^{$\frac{1}{2}$} ，由图 3 中，横座标上取 $oa = \sqrt{R_{\text{窗}}} = 0.4$ (千缪) ^{$\frac{1}{2}$} ，由 a 点作垂线与 $S=4$ 米²的曲线交于 b 点，由 b 点作水平线与纵座标交于 c ，则 c 点所表示的数值即为所需求算的风窗的面积，故 $S_{\text{窗}}=0.852$ 米²。

举例(2)，已知安设风窗处巷道的断面积 $S=11$ 米²，通过该巷道的风量 $Q=10$ 米³/秒，风窗所需消耗的风压值 $h_{\text{窗}}=25$ 毫米水柱，求 $S_{\text{窗}}$ 的大小。

解：
$$R_{\text{窗}} = \frac{h}{Q^2} = \frac{25}{10^2} = 0.25 \text{ 千缪}$$

$\therefore \sqrt{R_{\text{窗}}} = \sqrt{0.25} = 0.5$ (千缪) ^{$\frac{1}{2}$} ，在图 3 中，从横座标上找 $\sqrt{R_{\text{窗}}} = 0.5$ (千缪) ^{$\frac{1}{2}$} 点，由此点作垂直线交 $S=12$ 米²的曲线于 e ， $S=10$ 米²的曲线于 f 点，取 ef 的中点 d ，此点约在 ef 的 $\frac{2}{3}$ 的靠近 e 点处，由 d 点引水平线与纵座标交 g ，则 g 点所表明数值即为需求的风窗的断面积大小，即 $S_{\text{窗}}=0.8$ 米²

三、对几个问题的分析

通过上边的计算，并对表 1 和 $\sqrt{R_{\text{窗}}} \sim S_{\text{窗}}$ 曲线图的分析，使我们认识到如下几个问题：

1、 $S_{\text{窗}} > S'_{\text{窗}}$ ，即表明用精确式计算出来的 $S_{\text{窗}}$ 较由现用公式计算出来的 $S'_{\text{窗}}$ 大，其原因就在于，现用公式忽略了突然缩小时的局部阻力损失，视突然缩小的局部阻力损失为零（即 $h_{\text{收缩}}=0$ ），仅仅考虑了突然扩大的局部阻力损失；而精确式是考虑了突然收缩时的局部阻力损失和突然扩大时的局部阻力损失两部分。以前述举例中的 $h_{\text{窗}}=10$ 毫米水柱来说，这是需要风窗所造成的突然收缩和突然扩大两部分阻力来消耗的风压大小，即 $h_{\text{窗}}=10$ 毫米水柱 $= (h_{\text{收缩}} + h_{\text{扩大}})$ 毫米水柱，所以 $h_{\text{窗}} > h_{\text{扩大}}$ ，因而将 $h_{\text{窗}}=10$ 毫米水柱代入现用公式中计算出来的 $S'_{\text{窗}}$ 必然偏小；

2、从表 1 中分析可知：当 $R_{\text{窗}}$ 越小时，两式计算结果的差值 $\Delta h_{\text{窗}}$ 越大。 $R_{\text{窗}}$ 越小，即风窗面积越大时，用现用公式计算出来的 S' 误差越大。所以在 $\sqrt{R_{\text{窗}}}$ 较小时，用精确式进行计算就更显必要。而在现场生产实践中，风窗调节主要是用在采区内小阻力调节，所以用精确式进行计算具有现实意义；

3、当 $\sqrt{R_{\text{窗}}}$ 越大时，两式计算结果的差值 $\Delta S_{\text{窗}}$ 越小，当 $\sqrt{R_{\text{窗}}}$ 为 ∞ 时， $S_{\text{窗}}=0$ ，表明该巷道的调节风窗为密闭墙，则该巷道不通风；

4、分析图3这组曲线，当巷道断面积 $S < 10 \text{米}^2$ ，例如 $S = 8.7.6.5.4 \cdots \cdots \text{米}^2$ ，随着断面 S 越小曲线间隔越来越大；但当 $S > 10 \text{米}^2$ 时，例如 $S = 12、14、16 \cdots \cdots \text{米}^2$ 的各条曲线，随着 S 越大，各曲线相距越来越近，几乎重合，这种现象表明，当巷道断面积较大（ $S > 10 \text{米}^2$ ）时，风窗所在的巷道断面积的变化，对风窗的面积大小影响甚微。因为当 $\sqrt{R_{\text{窗}}}$ 一定时，即当风窗面积一定时，风窗所造成的突然收缩损失和突然扩大损失，其中突然扩大损失随着巷道断面积的增大所占比重增大，也就是说突然收缩损失随着巷道断面积的增大，所占比重减小。因而在 $\sqrt{R_{\text{窗}}}$ 为定值时，在巷道断面积 $S = 14 \text{米}^2$ 和 $S = 18 \text{米}^2$ 时。所对应的 $S_{\text{窗}}$ 相差甚小。

然而，采用风窗增阻调节法，如前述，一般用在采区内，而采区内回风道的断面积大小是 $S = 3 - 6 \text{米}^2$ 之间为多，其中 $S > 10 \text{米}^2$ 的较少，所以，用得较多的是图3中的 $S < 10 \text{米}^2$ 的各条曲线。

5、从以上分析可见，风窗所造成的局部阻力损失由突然收缩损失和突然扩大损失两部分组成，但以突然扩大损失为主，虽然收缩损失较小，但不能把它看做是零，即 $h_{\text{收缩}} \neq 0$ 。

※

※

※

结 语

井下风量调节是矿井通风工作中主要任务之一，所以，井下调节风量的工作是经常性的工作，但由于用现用的风窗面积计算公式来进行计算，也同样是很烦琐的，所以在实际工作中，很少去预先计算出调节风窗的面积，而是到井下需调节的风窗处，将风窗的活动调节板开大或关小点，再测一测风量，如不符合要求的风量，再调一调活动板，再测测风，如此往复调节才能达到目的，可是风窗面积到底应该调多大，事先心中无数。如果使用 $\sqrt{R_{\text{窗}}} \sim S_{\text{窗}}$ 曲线图，不需要进行烦琐的计算，就可知道需要的 $S_{\text{窗}}$ ，然后再到井下有目的地调节风窗的面积大小，完全可以做到事先心中有数。所以， $\sqrt{R_{\text{窗}}} \sim S_{\text{窗}}$ 曲线图，可以给井下风量调节工作带来方便。同时随着科学技术的发展，通风自动化，调节风窗的自动化，每个回采工作面的调节风窗由电子计算机控制，因此精确计算 $S_{\text{窗}}$ 有现实意义。仅供同志们使用参考，由于我们水平有限，不妥之处，请同志们批评指正。

参 考 书：

- 1、水力学 唐山铁道学院 范治纶编 人民教育出版社 61年版
- 2、煤矿通风与安全 10所院校协编 韩城矿务局印刷厂版 74年

