

小兒呼吸器使用的基本原則

林明志

機械呼吸的基本術語

陽壓及負壓呼吸

呼吸器可以經由二種方式將氣體輸送到病人肺中，一種是直接作用在氣道的壓力將氣體擠入肺中，另一種是經由胸廓的負壓而改變壓力動力學，以致氣體由相對性陽壓的大氣壓流向相對性負壓的肺中，目前臨床上應用較廣的是陽壓呼吸。

呼吸方式 (modes)

- **Assisted mode** :病人自行決定到底需要多少次呼吸，呼吸器感應到病人的呼吸力量，而將預設的容積或壓力輸送出去，幫病人輕鬆而有效的完成呼吸。
- **Control mode** :機器每分鐘給予一定次數的呼吸，但在這些固定的呼吸之間，病人無法自行呼吸，因此並非理想的呼吸方式。目前大多數呼吸器將之合併為所謂 A/C mode。
- **IMV mode** :機器每分鐘給予一定次數的呼吸，但在這些固定的呼吸之間，病人可以自行呼吸，所以是理想的呼吸方式之一。
- **SIMV mode** :和 IMV 相同，但可和病人的自發性呼吸同步化而不相拮抗。
- **CPAP mode** :病人經由呼吸器自行呼吸，呼吸器僅提供氣體的來源及加濕，但在呼氣終了時，機械裝置會使氣道壓力高於大氣壓 (PEEP)。
- **I/E ratio** :是指呼氣時間和吐氣時間的比值。在正常情形下，I/E 比值約為 1 : 2，臨床上常用到所謂 I/E 比值倒轉，是指 I/E 比值大於 1 : 1 的特殊情形。
- **敏感度(sensitivity)** :是指呼吸器能感應到病人呼吸需求的靈敏度。一般是指病人必須產生多少的負壓，呼吸器才能感應到。現在新式的呼吸器如 Servo-300 及 Servo-i 均有所謂的 flow sensor，藉由背景氣流的些微改變來偵測病人的呼吸動作，這在小兒科的應用是比傳統的負壓感應式實用。
- **呼氣末端陽壓(end-expiratory exhalation pressure, PEEP)** :PEEP 是一種機械上的技術，以防止呼吸終了時，氣道壓力降至大氣壓相同的程度，以防止肺泡塌陷。

需求式及連續式氣流 (demand flow V.S. continuous flow)

大多數的嬰兒呼吸器使用連續性氣流系統，病人可以在任何時間內吸到氣體，如本院目前採用之 VIPbird，Newport 系統。而所謂需求式氣流，是指機械必須感應到病人的吸氣需求時才供應氣流，如果無法感應到，則病人吸不到氣體，如本院目前採用之 Servo 系列。

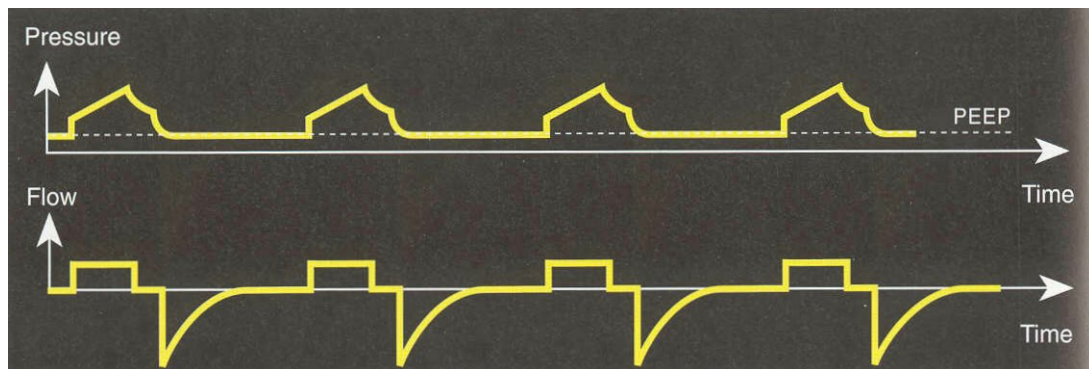
Time cycled, volume cycled, pressure cycled

呼吸器可經由三個基本的轉換機轉結束呼氣期即時間，容積，或是壓力。如果呼吸器是由預設的時間間隔來結束吸氣，則稱為時間轉換。如果是預設的容積輸出後就結束吸氣期稱為容積轉換，而如果是達到預設的壓力後結束吸氣期，則稱為壓力轉換。大部份的小兒呼吸器屬於時間轉換。

常用呼吸器 mode 的基本介紹

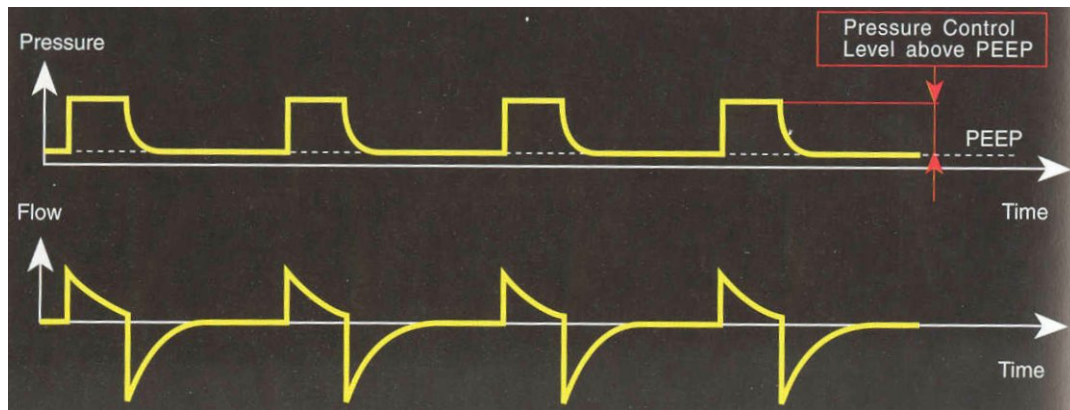
Control mode

1. Volume Control Mode



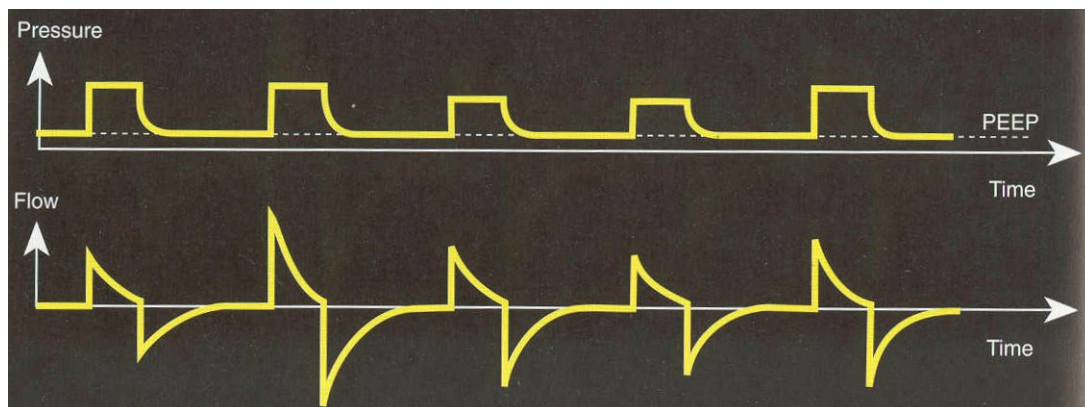
- 目的：提供預設的通氣量，以預設的呼吸速率及吸氣時間給予，與病人本身肺的阻力或是 compliance 無關。
- 應用：提供肺部正常因其他原因如開刀麻醉的病人使用。
- 特色：恆定的流速，符合一般生理狀態。

2. Pressure Control Mode



- **目的：**提供吸氣期恆定的壓力，避免不必要的高氣道壓力，遞減的 flow rate，可以控制呼吸速率及 I/E ratio。
- **應用：**一般用在無自主呼吸的病人，為兒童較常用的 control mode。應用於使用沒有 cuff 氣管內管或是氣管內管有漏氣情形的病人。Asthma，lung injury，COPD，bronchospasm 的病人。或是某些需要一開始較高 flow 使肺葉張開的病人，某些需要避免高氣道壓力的病人。

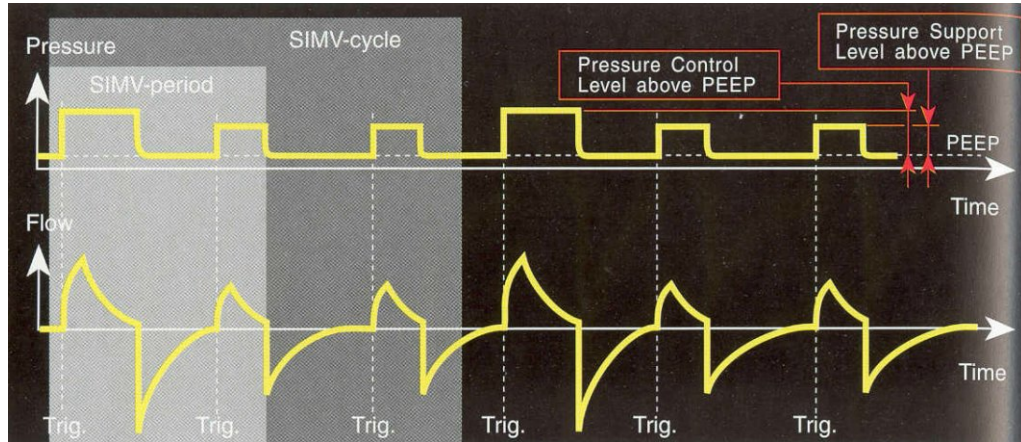
3. Pressure-regulated volume control (PRVC)



- **目的：**提供預設的通氣量，以預設的呼吸速率及吸氣時間給予，同時提供吸氣期恆定的壓力，遞減的 flow rate，可以控制呼吸速率及 I/E ratio。並在最低的 PIP 下提供預設的通氣量。
- **應用：**可以用在 lung injury，asthma，COPD，開完刀的病人，兒科病人，需要一開始較高 flow 使肺葉張開的病人，需要避免高氣道壓力的病人。
- **特色：**呼吸器根據前一次呼吸的通氣量，自動調整 PIP，以維持恆定的通氣量。呼吸的型態接近 pressure control，但又兼有 volume control 可控制分鐘通氣量的優點，可說是較理想的呼吸器模式，為近年來先進呼吸器發展的趨勢。唯應用在兒科病患，若是氣管內管的因為沒有 cuff，而有較顯著的漏氣情形時，會影響通氣量的測量，較不適用。

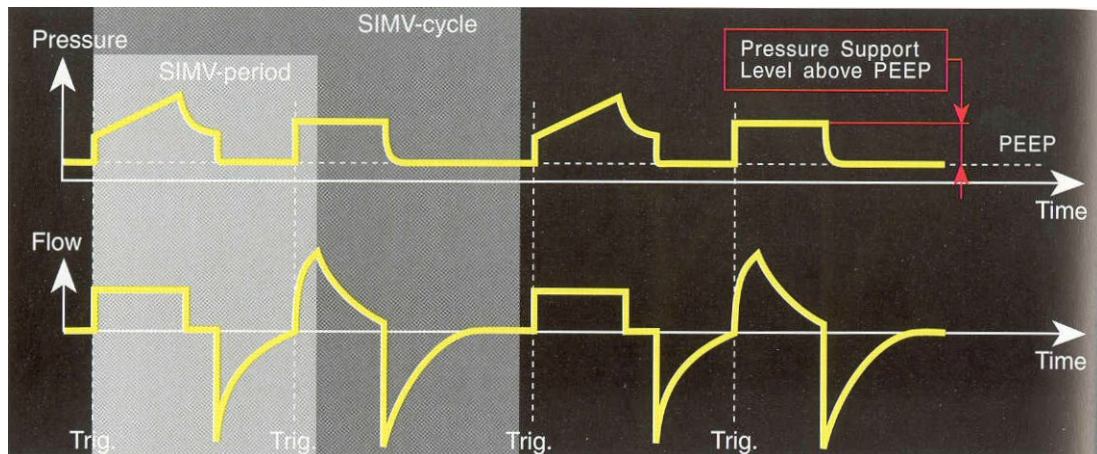
Support Mode (Weaning mode)

1. SIMV(PC)+pressure support



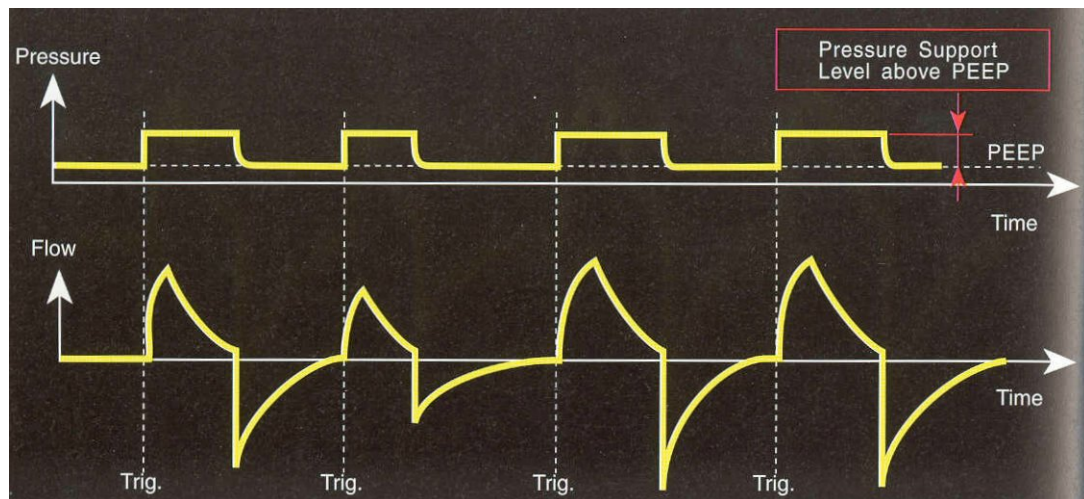
- 目的：在吸氣期間以一定的氣道壓力，提供部分的強制呼吸。可藉由降低 SIMV 的次數，來逐步脫離呼吸器。
- 應用：用於一些有一部份自主呼吸，但是不夠的病人，需要一開始較高 flow 使肺葉張開的病人，需要避免高氣道壓力的病人。沒有 cuff 氣管內管或是氣管內管有漏氣情形的病人，提供遞減的 flow rate。
- 注意事項：圖形中 SIMV period 是由機器上的 SIMV cycle 來決定(60/SIMV 秒)，而 SIMV period 是由 CMV rate 決定(60/CMV 秒)。病人在 SIMV period 內有呼吸的 trigger，他會得到一個預設大小的呼吸，而他在其他時間只會得到一個 pressure support 的，或是自主的呼吸。

2. SIMV(VC)+pressure support



與上述之 SIMV(PS)相同，差別僅在他的機械通氣是用 volume control。

3. Pressure support /CPAP :



- 目的：根據病人需求，提供快速有彈性的呼吸協助，以利脫離呼吸器。並監視病人之呼吸狀態。
- 應用：用在呼吸 drive 健全，但仍需要部分機械協助，或是需要 CPAP 來維持換氣的病人，或是嘗試脫離呼吸器的病人。
- 特色：完全由病人自行驅動，無保證的通氣量。

呼吸器的臨床應用

呼吸的目的就是交換氣體，使動脈血中含有適當的氧氣（和氧作用），供組織進行新陳代謝，同時將二氧化碳排出體外（換氣）。換句話說，使用呼吸器的目的，就是幫助功能不全的肺，維持適當的和氧作用及換氣。

要達到此目的，呼吸器必須將氣體輸送到肺中，維持一段預設的時間後再將其排出。大部份的呼吸器是以改變氣道對大氣壓的相對壓力來達到呼吸的功能。小兒科使用的呼吸器有“容積限制型”或“壓力限制型”二種。所謂壓力限制是指壓力達到預設值後，會維持該處直到吸氣完成。而容積限制則是在預設時間內將預設的容積輸送到肺中，二者均可產生潮氣容積。

何謂容積限制型(volume limited)呼吸器？

在容積限制型呼吸器，醫師可以預設適當的潮氣容積及吸氣氣流速率。大部份此類呼吸器是以恆定氣流速率輸出潮氣容積，而造成特殊吸氣情形。由於容積的輸出始終維持相當的恆定，因此肺機械力學（lung mechanics）改變時，近側氣道壓力亦隨之改變，所以氣道壓力取決於潮氣容積、氣流速率、氣道阻力及呼吸系統的彈性係數。在臨床上，可以經由氣道壓力的改變來評估病情的變化。

何謂壓力限制型(pressure limited)呼吸器？

前面曾提到呼吸器若要輸出潮氣容積，則近側氣道和肺之間必須要有一壓力差，但此一壓力差必須要存在一般足夠的時間，讓氣流進入肺中。在壓力限制型呼吸時，近側氣道壓力迅速的上升至設定值，且在吸氣時間內維持在該值。當容積逐漸進入肺中，肺泡壓也跟著升高，則近側氣道和肺泡的壓力逐漸減少，而氣流速率逐漸減低終至停止。病人的潮氣容積取決於氣流速率 (flow rate)，而影響氣流速率的主要因素有二：近側氣道及肺泡的壓力差及呼吸系統的機械性質（也就是阻力和彈性係數）。壓力限制型呼吸器產生的氣道壓力波形接近長方形，因此臨床上，由呼吸器所產生的近側氣道和肺泡的壓力差，可以當作是 PIP 減去 PEEP。在某一肺彈性係數值，潮氣容積和 (PIP-PEEP) 的壓力成正比。

另外，在某一壓力差的情況下，將某一容積輸出所需要的時間稱為時間常數 (time constant)，等於氣道阻力乘以肺彈性係數，其單位為秒

$$T_c = R * C$$

註：Tc = 時間常數

R = 呼吸道阻力

C = 肺彈性係數

在一個時間常數後，63.2% 的近側氣道壓力會傳遞到肺泡，**3 個時間常數後，95% 會傳遞到肺**，而 5 個時間常數才能達到潛能的潮氣容積，以若呼氣時間 < 5 個時間常數，則實際上的潮氣容積降低。例如：

$$C = 2.0 \text{ ml / cmH}_2\text{O}$$

$$R = 50 \text{ cmH}_2\text{O / L / sec}$$

$$T_c = 0.1 \text{ sec}$$

因此近側氣道壓力和肺泡壓力相等需要 $5 T_c = 0.5 \text{ sec}$

$$\text{若 } PIP = 25 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$PEEP = 5 \text{ cmH}_2\text{O}$$

$$\text{則 } PIP - PEEP = 20 \text{ cmH}_2\text{O}$$

由公式體積等於壓力乘以彈性係數

$$\text{最大的 } V_T = 20 * 2 = 40 \text{ ml}$$

若吸氣時間 < 0.5 sec，則實際上輸出的潮氣容積一定小於 40ml，若呼氣時間 < 0.5 sec，則氣體定無法完全排出。

在玻璃膜病時，氣道阻力正常，而肺彈性係數降低，因此時間常數很短，而嚴重的胎便吸入症候群，氣道阻力增加，肺彈性係數是正常或降低時，時間常數很長，因此需要較長的時間，才能使氣道壓力和肺泡壓力達到平衡。

綜上所述，可以知道在壓力限制型呼吸器，病人的潮氣容積取決於氣流速率，而影響氣流速率的因素，為近側氣道和肺泡的壓力差，以及呼吸系統的機械性質。臨床上我們可以藉著改變 (PIP - PEEP) 值，或吸氣時間而改變潮氣容積。

使用呼吸器的適應症

4. 血氣不足。當吸入氣體之氣體濃度 $>80\%$ ，而 PaO_2 仍 $<50\text{mmHg}$ 時。
5. 血碳酸過多。 $\text{PaCO}_2 >60\text{mmHg}$ 。
6. 暫時停止呼吸(apnea)頻繁。
7. 頑固的酸中毒。
8. 急救時或急救後。
9. 肌肉神經疾病時。
10. 嚴重心臟疾病者。

呼吸器的調整

如何調整呼吸器才是最適當的，視醫院及個人的經驗而不同，不過卻有一些基本的原則可以遵循。

動脈血氣體分析及呼吸器的調整

前面曾提到呼吸器的功能就是和氧作用及換氣，和氧作用適當與否，可以由 PaO_2 來評估，換氣的適當與否則視 PaO_2 而定，所以呼吸器使用的效能異常可歸納成四類：

1. PaCO_2 太高。
2. PaCO_2 太低。
3. PaO_2 太高。
4. PaO_2 太低。

1. 假如 PaCO_2 太高，則必須增加 V_E

因為由公式：

$$\text{PaCO}_2 = \text{VCO}_2 / \text{V}_A * K$$

其中 $\text{VCO}_2 =$ 組織每分鐘產生 CO_2 的量
 $\text{V}_A =$ 每分鐘肺泡換氣量
 $K =$ 常數

也就是說，如果 VCO_2 不變，則 PaCO_2 和 V_A 成反比， PaCO_2 增加 2 表示 V_A 減低。

另外由公式：

$$\text{V}_E = \text{V}_A + \text{V}_D = \text{V}_T * \text{RR}$$

其中 $\text{V}_E =$ 每分鐘換氣量， $\text{V}_A =$ 每分鐘肺泡換氣量
 $\text{V}_D =$ 每分鐘死腔換氣量， $\text{V}_T =$ 潮氣容積， $\text{RR} =$ 呼吸速率

可以知道如果 V_D 不變，則 V_E 和 V_A 成正比，增加 V_E 可以達到降低 $PaCO_2$ 的效果， V_E 的增加可以由增加 V_T 或 RR 來達到目的（如果壓力限制型呼吸器，則可藉著增加 PIP 或降低 $PEEP$ 或調低吸氣時間，來達到增加 V_T 的目的）。但如何決定應調整 V_T 還是 RR 呢？一般來說，假如 V_T 或 PIP 已經調整到上限值（如 $V_T = 15 \text{ ml/kg}$ ， $PIP = 30 \text{ cmH}_2\text{O}$ ，則應選擇增加 RR ，以達到增加 VE 的目的。）反過來說，如果 RR 已經設在上限值（如 $40/\text{min}$ ）， PIP 不高，每次呼吸時胸廓擴張並不明顯，則應選擇增加 PIP 或（ V_T ）。必須提醒的是 $PaCO_2$ 的增高，可能是由於呼吸器沒有供應預先設定的 V_E 所造成，如氣管內管太小造成漏氣、呼吸器接管鬆脫或氣管內管滑出等，當 $PaCO_2$ 升高時，首先要排除這些可能性，然後再調整呼吸器。

2. 假如 $PaCO_2$ 太低，則必須減低 V_E

這可以由減低 V_T 或 RR 來達到目的，一般我們希望維持 $PaCO_2$ 在 30-40mmH 之間（早產兒或是一些肺部非常不好的病人如 ARDS 的病人，現在我們主張的是 permissive CO_2 retention，也就是說， $PaCO_2$ 在 40-60mmH 之間，甚至更高一些，只要沒有造成嚴重之酸血症，是可以被允許的，甚至對於病人的預後還有一些好處），但有時我們希望 $PaCO_2$ 能維持在更低的範圍（例如顱內壓升高時，或是腸病毒重症的病人），所以 $PaCO_2$ 低於多少才需要減低 V_E 要視臨床狀況而定，至於要調整 V_T （或 PIP ）抑或 RR ，也是如上面提及的原則一樣； RR 是否已設的很高？ V_T 是否已設至上限？ PIP 是多少？胸廓擴張明顯嗎？

3. 假如 PaO_2 太高，則表示和氧作用非常有效

在新生兒適當的 PaO_2 為 50-70mmHg，因此若 $PaO_2 > 70 \text{ mmHg}$ ，則應設法降低，以避免發生併發症，如早產兒視網膜病變，決定和氧作用最主要的因毒為 FiO_2 及平均氣道壓力（mean airway pressure, Paw ）。所謂 Paw 是指呼吸周期肺內所產生的平均壓力，經由計算呼吸週期時間內近側氣道壓力波型下的壓積而得來的，決定 Paw 的因素包括流量率、 PIP 、 $PEEP$ 、吸氣時間及吐氣時間等。其公式如下：

$$Paw = [k (PIP - PEEP) Ti / (Ti + Te)] + PEEP$$

其中 Paw = 平均氣道壓力

PIP = 尖峰吸氣壓力

$PEEP$ = 呼氣末陽壓

Ti = 吸氣時間

Te = 呼氣時間

k = 波型常數（表示氣道壓力-波型的形狀，如理想的長方形波型 $K = 1.0$ ，三角形波型 $K = 0.5$ ，臨床上， K 隨著氣流速率及 Ti 改變，一般值在 0.89~0.98 左右）

如果在某一 Paw 時，病人的和氧作用最很適當，則改變呼吸器的設定（如增加 Ti 或降低 PIP 等），只要不改變 Paw ，則和氧作用應維持在原來的程度。所以 Paw 的監測是很重要的。至於應該先降 FiO_2 還是 Paw ，則是見仁見智。一般來說，如果 $FiO_2 > 0.5$ 超過 24 小時，則可能會造成肺部氧氣中毒，而太高的 Paw ，

則可能影響靜脈回流，以至心臟量減低或肺壓傷 (barotrauma)，因此應視何者可能造成立即而嚴重的危險來決定調整的優先順序。

4. 假如 PaO_2 太低，則表示組織缺氧，而必須立刻矯正

這可以經由增加 FiO_2 或 Paw 來達到目的。至於要調整何者，則須視病生理學而定，例如造成 PaO_2 降低的原因是擴散障礙時，增加 FiO_2 可以獲得立即的改善，若降低的原因，是肺泡塌陷而造成換氣灌流比不均 (V/Q mismatch) 時，則應增加 PEEP 來達到目的。

5. pH 值降低時

以往多以 $NaHCO_3$ 來治療，但在肺泡換氣 (V_A) 不足的情況下，若給予 $NaHCO_3$ 則 $PaCO_2$ 可能增高。另外，在早產兒， $NaHCO_3$ 的給予可能和腦室內出血有關，因此除非有證據顯示 pH 值降低，是由於原發性代謝性酸中毒所造成，否則應優先考慮以降低 $PaCO_2$ 的方法來改善 pH 值。

增加 FiO_2 也可以改善組織缺氧狀況，而達到矯正代謝性酸中毒的目的。此外，太高的 PIP 或太長的 Ti 也可能由於增加胸腔內的平均壓力，而使肺微血管的灌流減低，導致心輸出量降低，而造成組織和氧作用降低及酸中毒。因此降低 PIP 或 Ti 有時可能對 PH 值的改善有幫助。

