

昆蟲仿生學之發展研討會  
台大昆蟲系、生物產業機電工程學系 主辦

# (生物)循環系統

台大生機系 方煒  
2013/06/21

生物機電  
Bio-mechatronics  
向大自然學習  
Learn from the Nature

## Outline

- 生態上的循環系統
- 熱力學領域的循環系統
- 動物體內如何輸送物質
  - 開放式循環系統
  - 封閉式循環系統
- 生物與工程的對照
- 血液循環理論應用於冷凍空調系統的研發
- 血液循環與氣、氣與太極

## 生態上的循環系統

### 水循環

Source: Moran and Shapiro, 2004

### 碳循環

Source: Moran and Shapiro, 2004

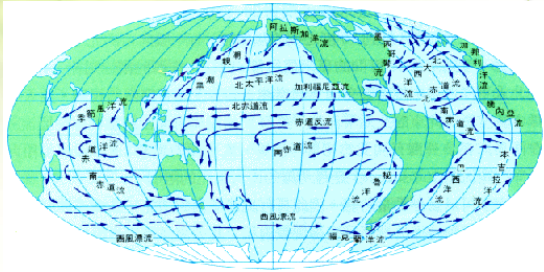
### 氮循環

Source: Moran and Shapiro, 2004

### 磷循環

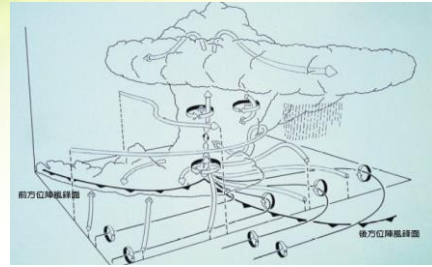
Source: Moran and Shapiro, 2004

### 海洋環流



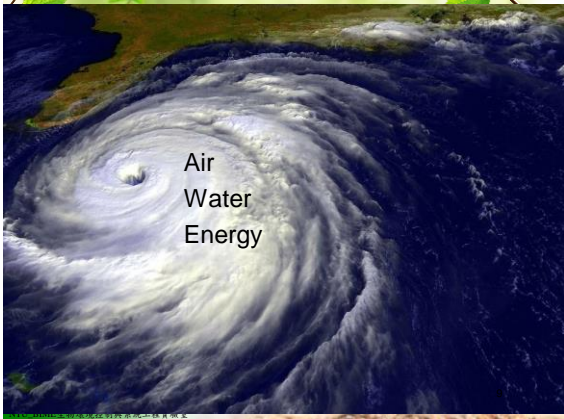
7

### 龍捲風 (乾冷+濕熱)



8

Air  
Water  
Energy



### 熱力學領域的循環系統



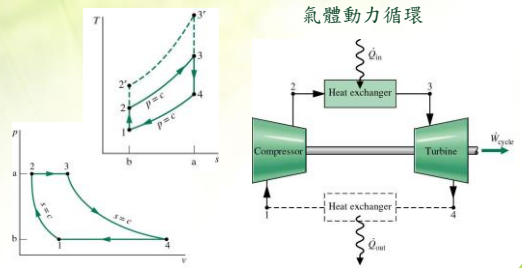
10

氣體動力循環  
蒸汽動力循環  
冷凍空調循環



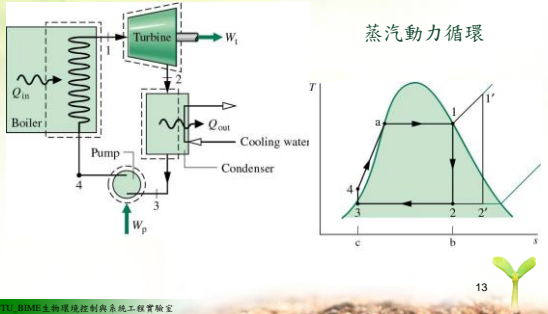
11

### Air-standard Brayton Cycle

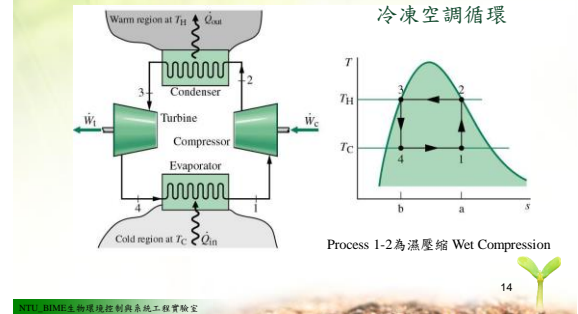


12

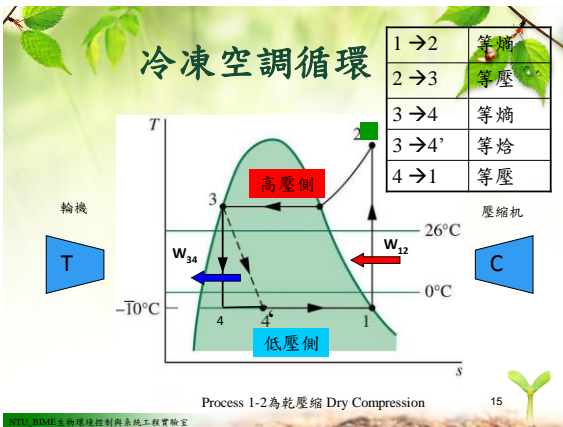
### Ideal Rankine Cycle



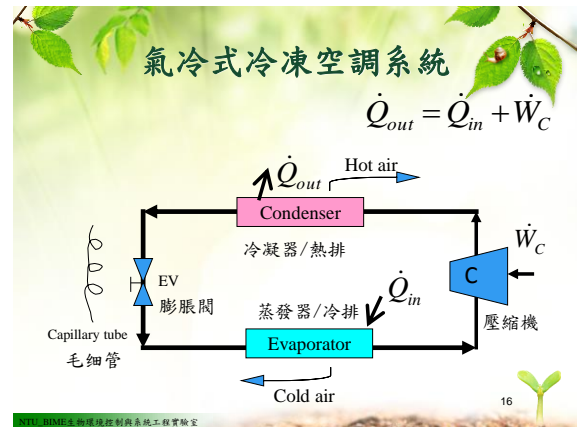
### Ideal Carnot Cycle



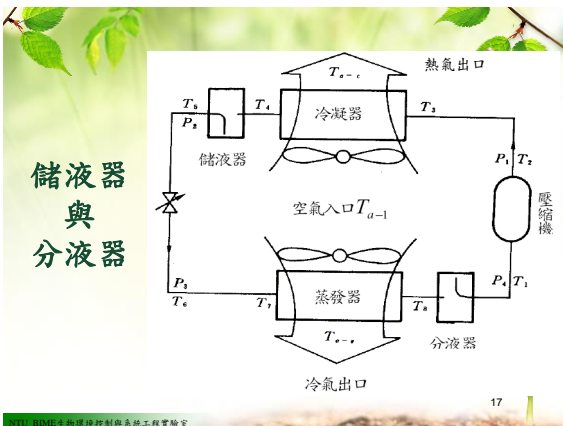
### 冷凍空調循環



### 氣冷式冷凍空調系統



### 儲液器與分液器



### 動物體內如何運輸物質?



- **細胞**藉**擴散**作用來使物質進出細胞膜，獲得養分。
- 海綿、水母及扁蟲類，可透過**擴散**與細胞周圍的組織液交換物質。



- 然而，....

21

- 然而，大多數的無脊椎動物與脊椎動物，單靠緩慢的擴散**無法滿足**全身各部細胞對養分的迫切**需求**，
- 因此發展出**循環系統**以負擔運輸物質的任務。

22

## 兩種循環系統

- **開放式**循環系統  
open circulatory system
- **閉鎖式**循環系統  
closed circulatory system

23

## 開放式循環系統

- 無脊椎動物，包括節肢動物（甲殼類、昆蟲、蜘蛛）和軟體動物（蝸牛、蚌）

↑ 開放空間(稱為**血腔**)

心臟 → 血管  
→ **體腔** → 心孔  
→ 心臟

血淋巴在血腔中

狀的網狀空間內，有擴張性的空間之內

24

## 開放式：蝗蟲的循環系統

側血管  
背血管  
心孔  
心臟

25

## 閉鎖式循環系統

- 所有脊椎動物(如蚯蚓、鳥賊)。

心臟 → 動脈  
→ 微血管 → 靜脈 → 心臟

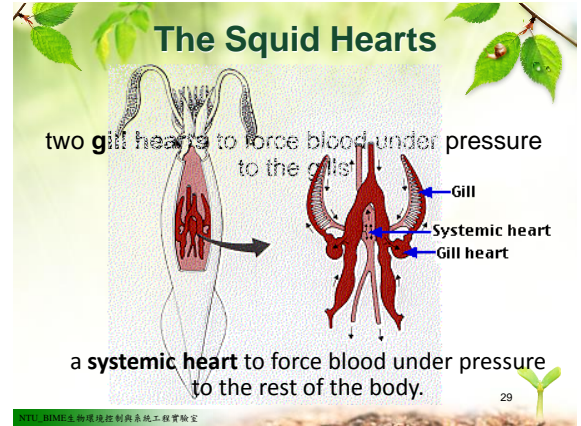
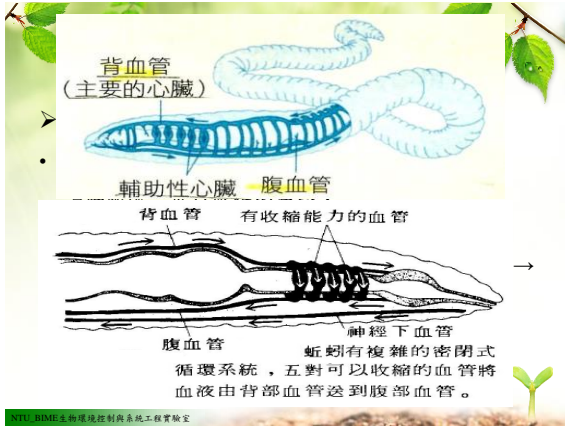
組織液

每個器官中的血管分支

之用；另外有許擴散作用。

- 藉著心臟的搏動，血液能迅速有效運送營養物和廢物，血壓較開放式循環系統高。

27



### parallel installation of hearts

34

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### parallel installation of compressors

80 USRT  
= 4 x 20 USRT

35

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### Examples on parallel distribution of pipes

36

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

37

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### 冷媒流向：分流，對調與合流

38

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### 血管：一管分歧為多管或多管合為一管

- 最佳管徑比例為多少時，能量損失最少？

39

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### Examples on 3 head pipes for even distribution of flow

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

40

背血管 (主要的心臟)  
輔助性心臟 腹血管

背血管 有收縮能力的血管

腹血管 神經下血管

蚯蚓有複雜的密閉式循環系統，五對可以收縮的血管將血液由背部血管送到腹部血管。

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

41

### 傳統 地底加熱系統1

熱瑜伽教室的地面 或 溫室地面

溫度非常不均勻

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

42

### 傳統 地底加熱系統2

溫度分佈有改善 但仍是不均勻

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

43

### 修正的 地底加熱系統

3 head pipes

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

44

### 修正的溫室地底加熱系統

3 head pipes

NTU, BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

45

### 血管：如何均勻輸送

3 head pipes

46

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### Examples on 'accumulator vessel'

47

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

Gills

心房 Atrium

心室 Ventricle

48

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

1 Incoming water Supply  
2 Header Tank  
3 High Pressure Float Valve  
4 Water Flow  
5 Venturi Feed Connectors  
6 One Way Valves  
7 4mm I.d Grommets  
8 Nutrient Containers  
9 In-Line Filter  
10 Diaphragm Pump  
11 Accumulator Vessel  
12 Water Outlet

Pump

49

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

50

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室

### Modified 冷凍空調系統

熱回收裝置

101 蒸發器/冷排

102

103

104 壓縮機

105 膨脹閥

106

107

108 冷凝器/熱排

109

110

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121 膨脹閥

51

NTU-BIME 生物環境控制與系統工程實驗室



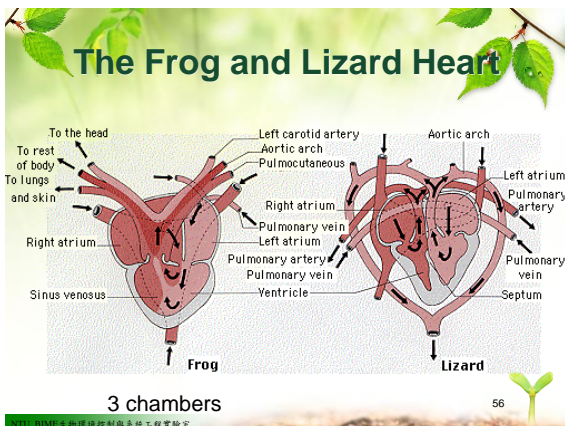


### 心臟的腔室數

類別	心房	心室	體循環 鰓/肺循環	備註
魚類	1	1	串聯	
兩生類	2	1	並聯	只有一個心室 充氧/缺氧血 <b>混合</b>
爬蟲類	2	2	並聯	心室間有小孔 充氧/缺氧血 <b>稍有區隔</b>
鳥類 哺乳類	2	2	並聯	充氧/缺氧血 <b>可完全區隔</b>

NTU, BIMR 生物環境控制與系統工程實驗室

53



### 鳥類、哺乳類的心臟

- 四個完整的腔室：二心房和二心室
- 血液循環路徑：肺循環和體循環
- 缺氧血流入右心房和右心室
- 充氧血流入左心房和左心室

鳥類或哺乳類的心臟

魚類的心臟

昆蟲類的心臟

蛙類的心臟

### 血液循環理論應用於冷凍空調系統的研發

NTU, BIMM 生物環境控制與系統工程實驗室

### 傳統 冷凍空調系統

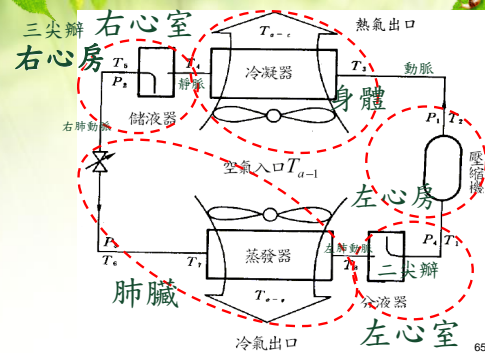
NTU, BIMM 生物環境控制與系統工程實驗室

## 心臟與血管

- 心臟縮放之間，血液為何不會逆流
  - 瓣膜
  - 血管的彈性
- 冷媒管沒有彈性，如何防止冷媒逆流？
  - 靠壓縮機的高速運轉
  - 靠儲液器與分液器

64

## Modified 冷凍空調系統



65

## 心臟之體循環(大循環) vs. 高壓側

- 充氧血液經壓縮由左心室經二尖瓣至左心房，在左心房經壓縮排出，
- 通過主昇動脈泵入體內上中下三區，供應主要器官氧氣之後成為缺氧血液
- 經過微血管，進入靜脈，流回心臟的右心室
- 冷媒進入分液器（代表左心室經二尖瓣至左心房的過程），氣態冷媒進入壓縮機至排出
- 冷媒在熱排散熱，冷凝成為液態冷媒，進入儲液器（代表右心室經三尖瓣至右心房的過程）

66

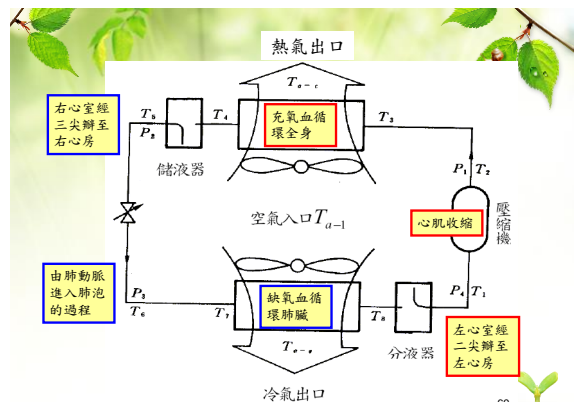
## 心臟之肺循環(小循環) vs. 低壓側

- 在右心房經壓縮排出的缺氧血液通過肺動脈泵入肺中
- 血液在肺泡（許多毛細管）內進行氣體交換，排出二氧化碳，吸進氧氣，使血液恢復成為充氧血液
- 通過肺靜脈回到左心室
- 在熱排末端的液態冷媒進入膨脹閥
- 冷媒經膨脹、降壓、在冷排吸熱、汽化，成為低壓氣態冷媒
- 分液器確保只有氣態冷媒，可以回到壓縮機

67

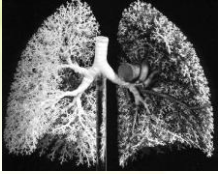
血液循環	冷凍空調
血管缺乏舒張壓就沒有彈性能，血管與器官都會扁掉	冷媒管缺乏低壓側壓力，大氣壓力與壓縮機的負壓會把冷媒管壓扁
收縮壓(血液擠向動脈)動態調配血液的力量	高壓側壓力
舒張壓(血液由動脈流出)保持血管彈性的力量	低壓側壓力讓冷媒流回壓縮機的力量
體循環供給身體氧氣	高壓側散熱
肺循環交換取得氧氣	低壓側吸熱

68

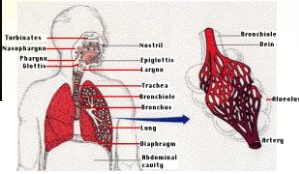


69

## 肺臟負責氣體交換



氣體交換在毛細管進行



70

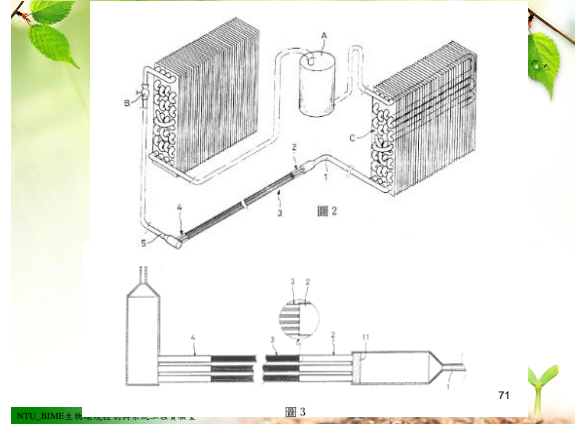
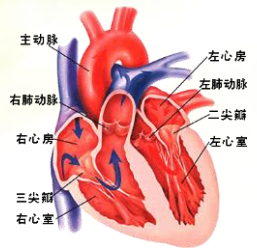


圖 3

71

## Four Chambers: Birds and Mammals

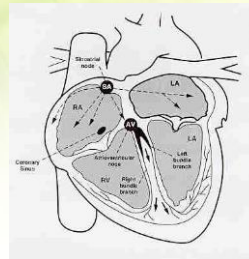
- double pump ??
- 體循環/大循環
- 肺循環/小循環



72

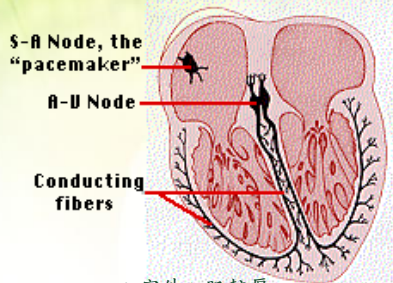
## SA node (竇房結) and AV node (房室結)

- SA node 產生脈衝 (frequency)
- AV node 決定持續時間 (duty ratio)



73

右心室上SA node (竇房結) 每分鐘產生60~72次電脈衝訊號 (1~1.2 Hz)



74

## 血液循環理論 應用於冷凍空調系統的研究

- 串行式壓縮系統 (兩個壓縮機)
  - 二元式
  - 一元式
  - 含中間冷卻的一元式

75

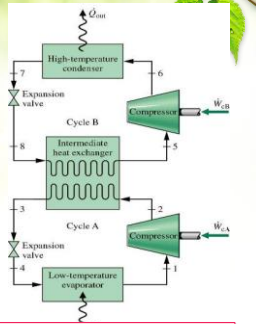
### 兩個循環串行 二元式

- 二元串行式壓縮系統
- 二元：兩種不同冷媒

類似  
一顆心臟，雙心房與心室

Cycle B: 體循環

Cycle A: 肺循環

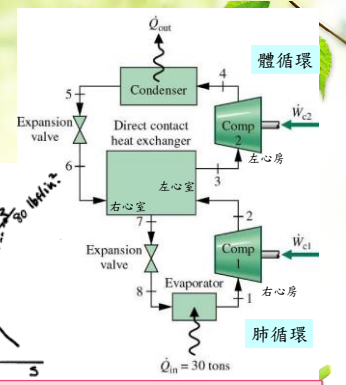
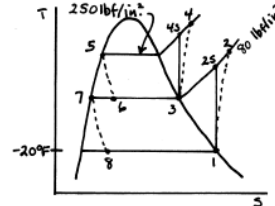


SA node & AV node are much more superior than this in all faces.

76

### 兩個循環串行 一元式

各一個膨脹閥  
共用冷熱排(相同冷媒)



兩個心室沒有區隔，效率較差

77

### 兩段壓縮機串行

#### 兩生類的心臟

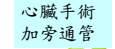
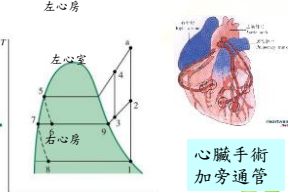
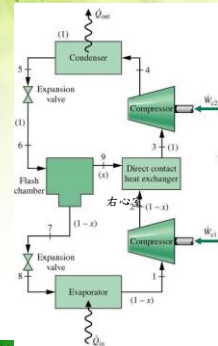
- 三個腔室：二心房和一心室
- 血液循環有肺循環和體循環兩個階段
- 心室中間雖具有肌肉室突起，但無法完全分開其在左心房的充氣和右心室的抽氣



78

### 含中間冷却的一元串行式壓縮冷凍循環

- 優點：
- 省下Area 2-3-4-a 的輸入功
  - 避免T<sub>a</sub>的高溫
  - 高壓側平均溫度降低



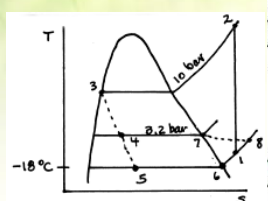
心臟手術  
加旁通管

79

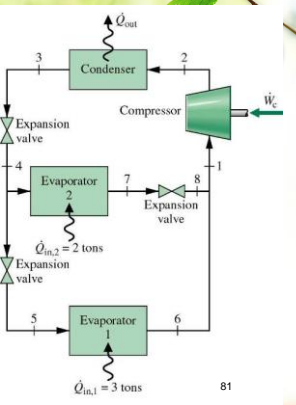
### 血液循環理論應用於冷凍空調系統的研究

- 小循環：  
□一個壓縮機 配 兩個蒸發器(冷排)
- 大循環：  
□一個壓縮機 配 兩個冷凝器(熱排)

### 小循環： 一個壓縮機、兩個蒸發器



一顆心臟，兩片肺  
一對二，分離式冷氣



81

## 一對多，分離式冷氣

室外機      室內機      室內機

82

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 大循環：一個壓縮機，兩個冷凝器

充氧血供應  
身體各區  
器官的氧氣

83  
2000, 左

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 血液循環理論 應用於冷凍空調系統的研究

- 多一個壓縮機
- 高血壓 vs. 壓縮機高負荷

84

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 多一個壓縮機

心臟手術  
一顆不够再加一顆

85

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 兩顆不够 再加一顆

### 三心人 黃泰明 心情多溫柔

補入兩顆男心臟 挽回一命 自覺患者個性依舊 老婆說他變溫柔了

86

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 高血壓

### 壓縮機高負荷

- 高舒張壓：肺功能不足造成血液含氧量不足
- 高收縮壓：動脈硬化或阻塞造成血液循環差，供血量不足
- 造成器官缺氧，
- 心臟加速動作，形成高血壓

- 低壓側冷排中冷媒吸熱不足，液態冷媒被液氣分離裝置留住，進入壓縮機的氣態冷媒量不足
- 高壓側熱排中散熱過度，液態冷媒多，造成壓損大
- 壓縮機負荷大，過熱，停機

87

NTU-RIIME 生物環境控制與系統工程實驗室

## 高收縮壓 壓縮機高負荷

- 動脈硬化或阻塞造成血液循環差，供血量不足
- 治療之道：支架



- 管路阻力大
- 高壓側熱排中散熱過度，液態冷媒多，造成壓損大
- 克服之道：高壓側安裝蓄壓器

88

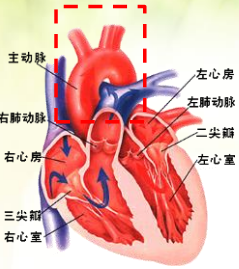
## 人工心臟研究上的盲點



只將心臟視為 Pump  
由流體力學的觀點無法解釋  
為什麼血液一離開心臟便有一個大轉彎？  
也無法解釋主要器官與主動脈為何是垂直連接？

89

## 主動脈為何是個大轉彎？

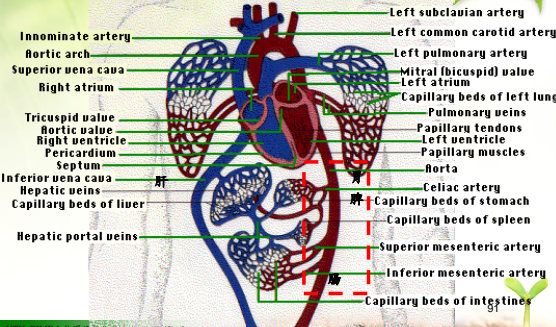


將大部分動能轉換為血管的彈性位能

王唯工· 歲的樂章

90

## 主要器官與主動脈為何是垂直連接？

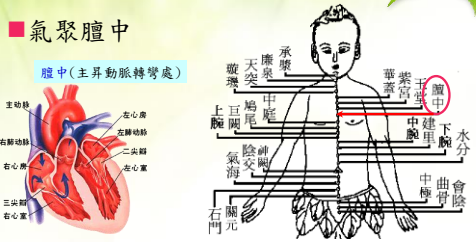


91

## 血液循環與「氣」

### 氣聚腫中

腫中(主升動脈轉彎處)



血液循環中動能只占總能量的2%  
98%能量在腫中(主升動脈轉彎處)轉為彈性位能  
血管缺乏彈性位能，就沒有舒張壓，血管與器官都會扁掉

王唯工· 2004

92

## 「氣」與太極

- 中醫的「氣」事實上是一種共振也是人體血液循環的動力
- 太極：氣機導引  
講究的也是循環  
以自體為軸心的循環

93

