

# 自動控制的過去與現在

- 民國六十年中國工程師年會演講

陳之藩

在二十世紀三十年代，美國的哈佛醫學院，有位教授若蓀布魯斯(Rosenblueth)每月召集一個談話會。地點是在萬德柏廳(Vanderbilt Hall)大家在一個圓桌上聚餐，隨後是聚談。出席的人以醫生為最多，可是並不限於醫生。飯後，由其中的一個人，或邀請一個人，講一段心得。思想可以是半生不熟，體裁可以是未經裁剪，也許有時是過分自信，也許有時是過分誇張。當然最談不到的是謹嚴。有些參加的人，不能忍受，來一回就不再來了。不過大多數的人，以為這個會很有價值。因為參加的人並不是僅僅是醫生或醫學家，還有物理學家、生物學家。麻省理工學院距離很近，那裏的教授也來了好多人。其中一個人是溫納(Nobert Wiener)。

這個由各個方面專門學問中走來的科學家們，是沒有共同語言可談的。但為什麼越談越有興趣呢？他們究竟談些什麼大家全能欣賞的題目呢？又有什麼題目可以引出個人有價值的言論，可以提起團體的興趣呢？

他們所根據的是每個人專門的學問。而所談的，是使大家能領悟的，是根據個人的觀點所了解的科學方法。

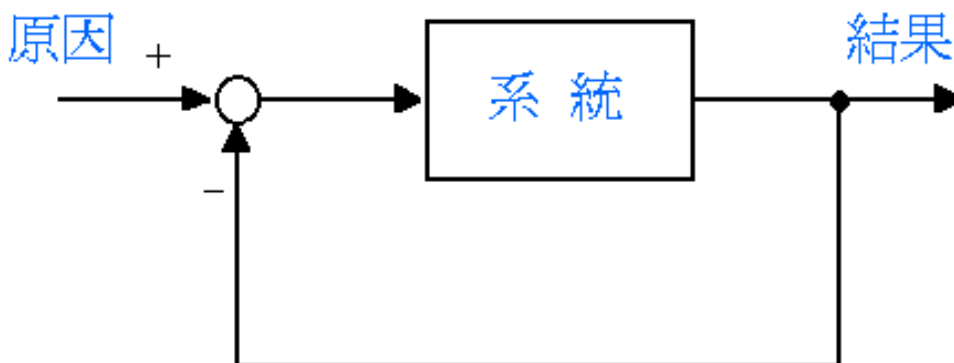
生物學家的術語，數學家不會理解，但生物學家所用的方法，數學家可能領悟；物理學家的語言，醫生不會明瞭，可是物理學家所用的方法，醫生卻有瞭然的可能。這個談話會是三十六行，但話題卻集中在科學方法上，所以可以說是科學方法談話會。

自從萊布尼茲(Leibniz)而後，世界上再沒有統攝整個科學領域的通才。到了十九世紀，幾位大的科學家，也只是稱雄一面。十九世紀沒有出萊布尼茲，而只有出高斯(Gauss)，法拉第(Faraday)，達爾文(Darwin)這類大人物，我們把他們名為數學家、物理學家、生物學家等。可是到了二十世紀，配稱數學家的也不見了，對於一位專門的大家，在稱呼時必加以限制，如拓扑學的數學家；或光學的物理學家等。

這種過度的分工，是不得不然的，是越演越烈的。由一行分成三十六行，由三十六行分成三百六十行，由三百六十行，分成三千六百行，二十世紀的科學家，不下三萬六千行了。

這種局面的形成，產生了兩個副作用，第一、是行與行間形成了許多無人管的地帶，第二、甲行所研究出的程序、方法、或設備，可能對乙行有極大的效用，但乙行常無從利用起，依然是從頭開始。哈佛醫學院的談話會，正是在這種氣候下產生的。而就由這個會中產生了『自動控制』的基本觀念。

## 第一道源泉 - 反饋的觀念



有一位醫生在這個談話會中，作了這樣的報告：有一種病人，坐在椅子上，與健康的人毫無差別。但你如果給他一支香煙，他伸手接煙時，總對不準香煙的位置，不是左搖就是右偏，他的手變成搖來搖去的運動，而始終接不到香煙。

這位病人的肌肉是強壯的，身體是健康的。但是卻不能有系統的組織他的動作。

這個現象很像一個舵手把舵時，把船身形成了左右擺動一樣。人所以不能接一支香煙，是因為人的動作是受制於一種信號，而這個信號的大小卻為正在進行中的反應所左右。換句話說，一個原因產生一個相應的結果，而這個結果又成為一個新的原因刺激到原來的系統上。把隨時所產生的效果變成了原因的一部分。如果把原因結果的相互關係圖解出來，如上圖。

談話會的這個觀念，形成以後，忽然大家覺得天朗氣清起來。並不只是速度控制器操縱著火車的速度，而火車的速度無時不在操縱著速度控制器的行為；並不只是人的神經在控制著手的位移方向，而且位移方向隨時左右著手的神經。某一原因施於一物體，產生一相應的結果，我們叫做直接程序，結果的行為又成了原因的一部份，而重施於該物體上，我們叫做反饋程序。

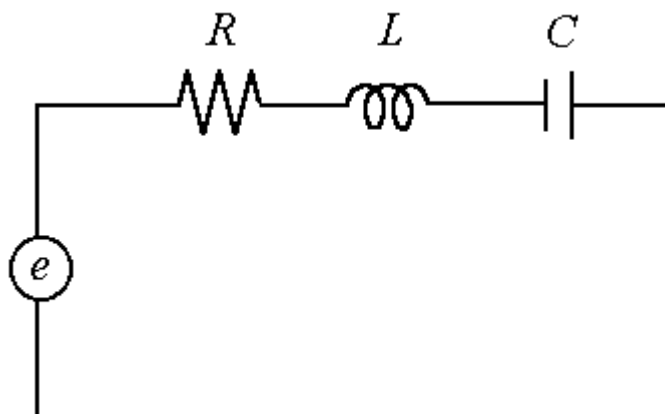
這門學問的性質似乎與別的學問全不相同，它是一種分析上的觀點，正因為是一種觀點，所以施用到各方面都可以產生出一個新天地來。

這時候，談話會的人，不自然的而然的想到經濟結構上可以利用，政治體制上可以利用，商業經營上可以利用。

比如福特(Ford)當年以獨特的眼光，給工人加薪，那時，他曾辯論說，給工人加薪似乎是成本高，但工人又買汽車坐，汽車銷路就大了，汽車的銷路一大，成本就減低了。他這套理論很像反饋的觀念的利用。

溫納把這門學問鑄了一個備用的字 Cybernetics 這個字是源於希臘，意思是舵手。安培曾把這個字當作政府管理學。馬克士威爾有一篇文章專說控速器，這個字 Governor 是源於拉丁。不論是希臘字，還是拉丁字。有人用在操縱的意義上，有人用在舵向的意義上，有人用在管理的意義上，有人用在限制的意義上。於是這個意義貫穿了物理、數學、生物、經濟以及政治等。我們把這門學問模

糊的譯出意義來，是『自動控制學』(Automatic Control)。



### 第二道源泉 - 模擬的觀念

戰時的麻省理工學院，是一個研究中心。不但英國來了好多科學家，就是美國好多名大學的科學家也徵召到這裏。麻省的劍橋成了一個大熔爐，關心的事務很多，但最重要的還是這些科學家的大集會。這時英國的受擊一天比一天加厲，高射炮火的研究一天比一天重要，而反饋觀念，就在工程上、科學上的各部門在傳染。

由雷達偵察飛機，到高射炮自動開火，是一個有反饋觀念自動控制過程。可是這個系統所涉及的部門，卻不是單純的一件東西，有機械、電機、流控、氣控各種形式的信號的流動。如何研究這些信號，不是一個性質上的問題，而是一個數量上的問題。於是模擬的觀念加強起來。

重要的貢獻者，有伽得諾(Gardner)、布朗(Brown)、堪布(Campbell)，尼克斯(Nichols)等。有的在建立電機與機械的模擬，有的在建造化工、氣體的模擬。究竟什麼是模擬的觀念呢？

我們在講力學時，總講牛頓第二定律：所加於物體的力與物體所產生的加速度成比例。這個比例常數是該物的質量。換句話說，如果加速度小，就表示質量大，如果加速大，就表示質量小。我們又把質量的這種特殊性質叫做惰性。

在講電學時，我們又遇到一個定律叫做法拉第定律，所加於線圈的電壓與線圈所產生的電流之變率成比例，我們把這個比例常數叫電感。電感有時候我們稱為線圈的惰性。

在學電學時，總是覺得這是一個很難理解的現象。於是我們就想，線圈對電壓的阻撓，正相當於質量對力的阻撓一樣。於是就明白了。

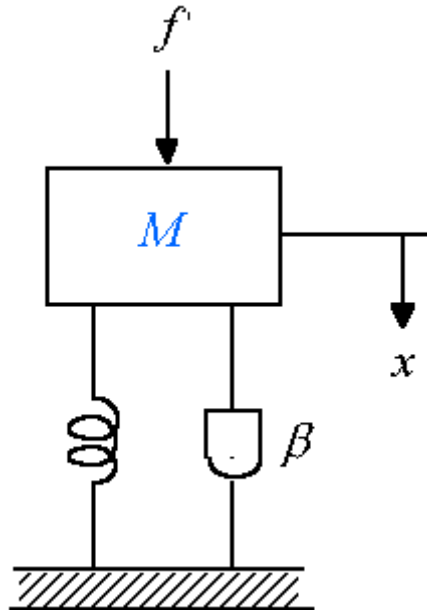
再舉一個例，一個 RLC 線圈如上圖。

我們如列出它的微分方程式來，應是

$$e = R_1 i + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (1)$$

現在有一機械系統，我們如果列出它的微分方程式來應是

$$M \frac{dv}{dt} + Bv + k \int v dt = f \quad (2)$$



一個是電系統，一個是機械系統，所用的定律全不相干，可是列出的式子卻極相像。我們如想知道這個機械系統運動的情況，可以由線路上面電流運動的情況而領悟出來。

我們把這個電的線路叫做這個機械系統的模擬，而這機械系統叫做該線路的模擬。一個電機工程師可以對機械全不在行，但當他知道了質量相當於電感，摩擦相當於電阻，彈性相當於電容時，他立刻由線路上電流所應有的行為，領悟到這個機械系統應有的速度的情況。

模擬的觀念是古已有之的。凡是不容易說通的地方，就可用模擬的辦法以助人明瞭。我國的孟子、莊子，處處在用模擬的方法，聖經裏有不知多少模擬的故事與成例。

可是在性質上的模擬，不易用於科學。但自從這種定量的模擬成功以後，效用就展開了。

所以一個包含各式各樣複雜成份的機械，均可以用模擬的辦法變成單純的模型，理解起來，就方便多了。

伽得諾於是把電的元件與機械的元件，作了極詳細的比擬。堪布把熱力上的程序、化工上的程序、氣控上的程序、流控上的程序，均作了極詳細深刻的電的模擬的研究。

看來渺不相關的東西，在模擬的觀點下，是一樣的。比如大至魚雷，小至電流計，可以互相模擬，飛機的操作，可以與潛艇的運行相模擬，至於在數量上的模擬，幾乎所有物理系統均可以用電子管組成模型，這方面發展的極致成了電子模擬計算機(Electronic Analogue Computer)。

### 第三道源泉 - 數字計算機

在戰事正在進行中的一九四三年，費城的賓夕法尼亞大學有一個二十四歲的助教，叫做艾克特(Eckert)，另外還有一個顧問叫做毛士萊(Mauchly)，他們領導著十二位科學家，作了 200,000 工時，完成了世界第一架數字電子計算機。

開始的那一天，我們的主任工程師永遠不會忘記的，因為那天他剛過了二十四歲生日。在這位二十四歲的工程師領導下所建的世界第一個數字計算機有多大呢？是比當時的任何最大型計算機大一千倍。這個計算機的能力相當於 5,000 人的計算能力。桌用計算機要作二十個鐘頭的題目，這個計算機作十秒就完成了。

多大呢？三十呎寬五十呎長屋子才能放下這個計算機。多重呢？三十噸。用多少電呢？相當於一個大廣播電台。它的名字叫做 ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Computer)。

消息發佈了以後，蘇聯政府馬上要向賓夕法尼亞大學買一部。蘇聯的這個企圖沒有成功。後來把這架計算機搬到馬里蘭州一個鎮上。一九四七開始運用的。不久就變成了一匹工作的良馬。天氣預報的計算用它、氫彈的計算用它、宇宙線的測定計算用它、風洞的設計計算用它。

幾乎一夜之間，計算機變成了一個新的企業，打入了商業、管理、軍事、工業....，幾乎是無孔不入。

於是自動控制學中，加入一個新的生力軍，數字計算機也成為一個元件了。

電子數字計算機，就是由大量電子線路所組成的極為複雜的自動裝置。預先編就的一定程序對數字作大量的算術、邏輯及其它操作。

所謂算術操作，是加法、減法、乘法與除法。所謂邏輯操作是比較兩數、選擇大小、確定符號、確定數值等。

處理大量數字與複雜程序，最主要的一個關鍵是必須精確，十進位的數字制是不能產生精確值的。最好的辦法是用二進位制。

二進位只有兩個數 0 與 1，如果拿電路的開路叫做 0，閉路叫做 1，則永遠不會產生誤差，因為電路非關即閉。

只有兩個數字 0 及 1，但任何數全可以由這兩個數代表出來，表列如下：

十進制	二進制
0	0
1	1
2	10
3	11
4	100
5	101
6	110
7	111
8	1000
9	1001
10	1010

37 在二進位中是 100101，正如我們在寫 37 時，我們的意思是  $37=3 \cdot 10^1+7 \cdot 10^0$

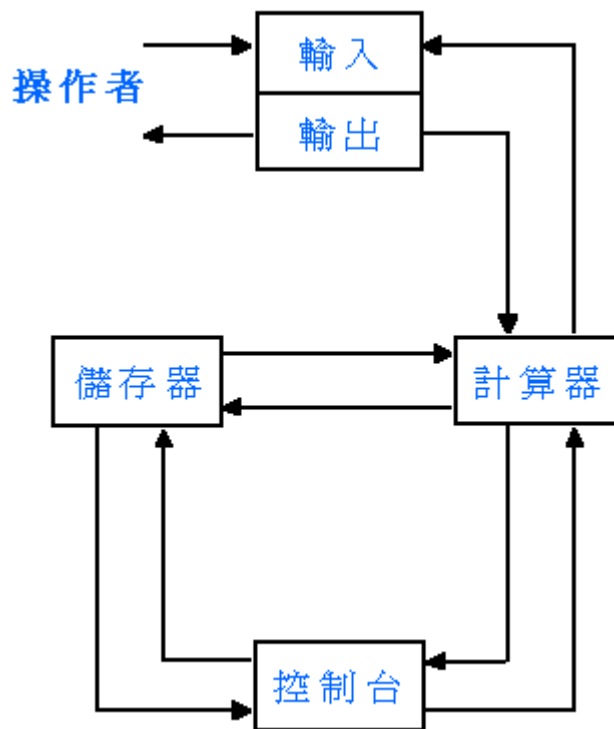
我們在寫 100101 時意思是

至於加減乘除，所用的法則，與普通所用的，也無大異比如  $62 \times 5$  是

$$\begin{array}{r}
 111110 \\
 \quad 101 \\
 \hline
 111110 \\
 000000 \\
 111110 \\
 \hline
 100110110
 \end{array}$$

利用這種數字制度，而又用電路的開否代表 1 或 0，於是數字計算機的準確可靠性大為增加。

至於計算機的構成大致分為五大部份，說明如圖所示：



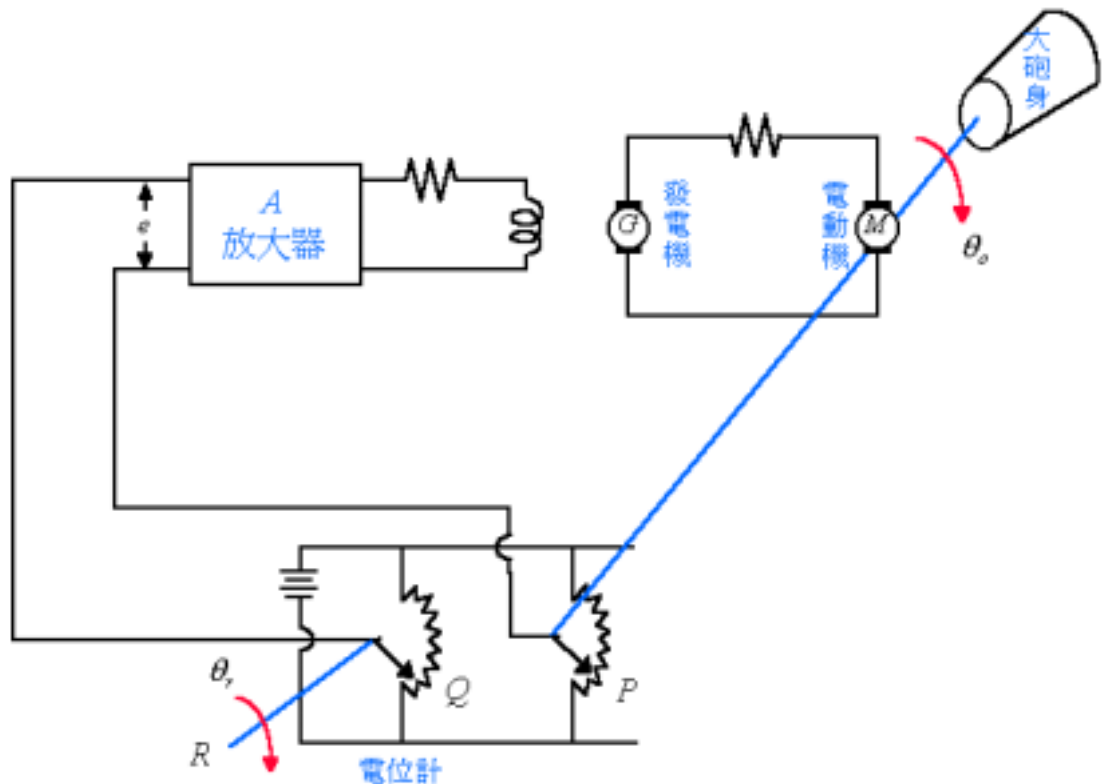
### 由自控機構到自控觀點

上面所說的由三十年代到五十年代所發展起來的幾個大觀念，逐漸聚合，逐漸形成了一門新的學問，而這門新的學問的內容，也無時不在那裏補充與改變。按照史實說，自動控制應該由瓦特時代的蒸汽機上的控速器說起，應該由馬克士威爾的對控速器的分析算起。我們可以說這是把自動控制當成一個機件來看待的時代。

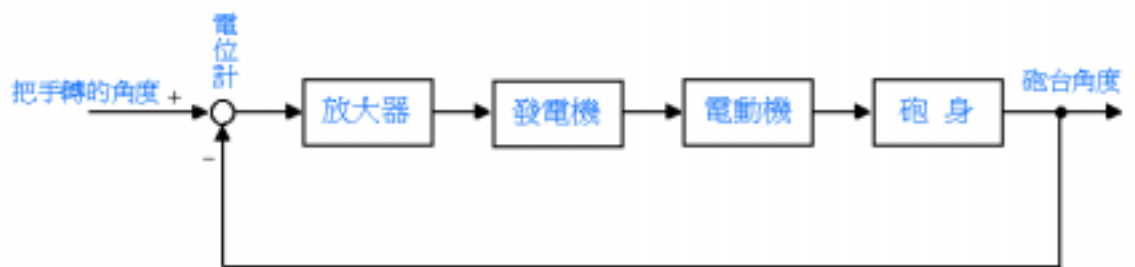
到了二次大戰期間，由控制砲位，到控制飛機，到控制航艦等，可以說把自動控制當成一套機構來看待的時代。

我們看一看下個例子：

我們如轉動把手 R 成一新的角度，Q 接觸點即向上移，於是 P 與 Q 間發生電位差，差值是  $e$ ，作用在放大器 A 上，由 A 產生的電壓，影響發電機 G，於是電動機受影響而轉動，電動機的負荷，即砲身，即跟著轉動。砲自轉動時 P 點也上行，終於 PQ 電位又復相等，電位差  $e$  等於零，一切都不再動了。



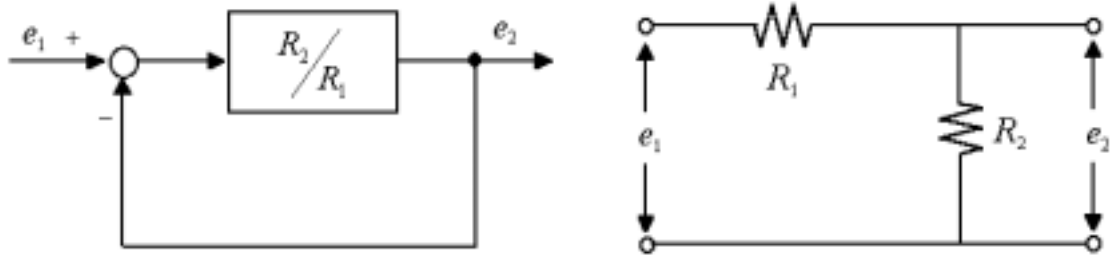
這是一套機構，而是自動的連帶作用。我們如畫個寫意圖是如下列：



電位計的作用很像觸覺神經，它可以感覺出來負荷的情況，這個結果成為原因的一部份，重新作用到系統上。把手的命令標準是多少角度，砲身一步一趨的遵守命令。這一套機構看來像個有頭腦的奴隸，所以我們又把這套機構叫做奴隸機構(Servomechanisms)。

等到自動控制成了一種觀點以後，很多大大小小的程序都可以看作自動系統。大而至於人造衛星的整個控制系統，自導飛彈的整個控制系統，小至於一個單純的電位計，都可以看成自動控制系統，很容易找出自動控制所具備的元件來。比如一個簡單線路如下圖，可以看成一個自動反饋系統如下圖：





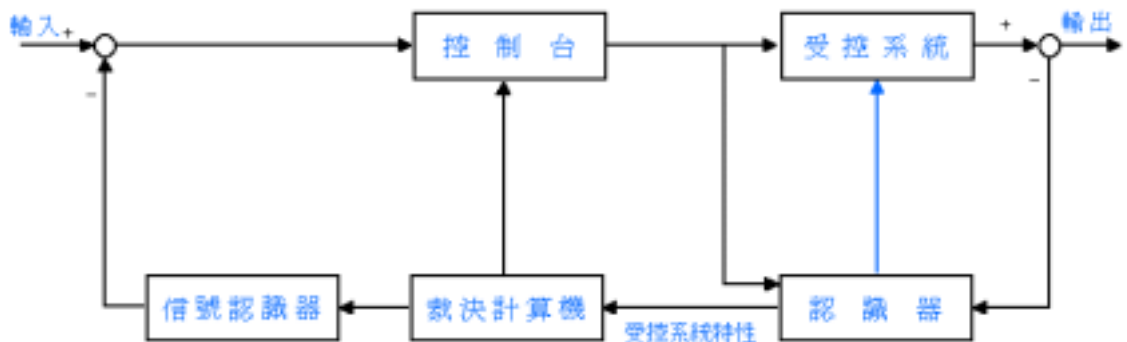
又如一個單獨的電動機，也可視為一個自足的自動系統。回電壓(Back emf)正是在反饋線路上。英國人在這方面作了好多有趣的分析工作。

### 由古典控制論到適應控制論

五十年代末，到六十年代初，上面所說的自動控制系統，已成為典型的看法。但是在這個時候產生了一個新的潮流。即是：一個控制系統的環境不會不變，一個控制系統各種元件本身也不會不變。假如內或外有所改變時，在自動控制學上應該作些什麼處理，於是產生了一門新的自動控制學，即適應控制論(Adaptive Control)。

適應控制論與古典控制論主要不同的地方，是系統本身，隨時在認識環境，認識自己，用計算機，算出新的措置，從而統攝整個系統。

如用圖解，說明如下：



適應控制系統比起古典自動系統來主要多出幾種東西，一是測量環境認識自我特性的認識器(Identifier)，一種是作裁決作用的計算機(Decision computer)，由認識環境到自我改變組織，正是現在研究的大方向。英國的艾士倍(Ashby)美國貝爾門(Bellman)和蘇聯的艾茲曼(Azerman)均是適應控制的開拓者。

艾士倍大聲疾呼製造與生物相同的智慧，只是一個時間問題與價錢問題，他並不認為是一個性質上的問題。

### 生物機構的再研究

自動控制學既是起源於病人一種病態的分析，經過了二三十年的發展以後，目標又轉回生物的研究上。換句話說，工程師們向上帝的創造設計覓取靈感。一九六一年度，美國政府與歐洲政府的英、法、意、德、瑞士、南美的智利、阿根廷等國的科學機構訂了好多合同，研究的題目是希奇古怪，比如研究蛙的

眼睛，章魚的學習能力等。

於是，有人就猜了，說是美國政府誠心讓外國科學家去做毫無意義的工作，而讓美國科學家作重要的國防研究。但是這些批評的人不曉得，美國政府在國內所花的這類的錢，要比在國外還多。而事實上，蘇聯也是向這方面拼命的努力。就以蛙的眼睛來說罷？蛙只吃活著的昆蟲。它的眼睛可以立時看到一個飛的蒼蠅而把它吃掉。但你如放一堆死的蒼蠅在它周圍，蛙即毫無感覺，目無所見。這是因為蛙的眼並不是把它所看到的所有的東西都報告它的大腦，而是只報告對它生存有需要的事物。蛙的眼睛對於它的敵人的一舉一動都看得見，而對於並無威脅的東西一無所見。

如果工程師能建立一種類似蛙眼的機構，可以辨認敵機於各種混亂信號之中豈不使現代雷達系統大為增強效力？

蛙眼機構如果成功就是對平時也有用處，比如現在大的飛機場每年亦有二千萬架次，到一九七五年可以增至四千萬架次。機場必須建立有高度辨識能力自動系統，來解決這個頭痛的大難題。

這不過是一個這方面研究的例子。美國在去年就有二萬個生物學家參加這方面的研究工作。比十年以前的人數增加一倍。

自動控制學，由生物學界到數學界，到工程界，再到生物學界，江流越聚越多，波濤越來越壯闊了。