

我国古代在自动調整系統方面的成就

万 百 五

摘 要

本文論証了：約二千年前我国发明和使用的指南車，是一个按扰动調整原則工作的开周自动調整系統。而約九百年前，北宋时代的苏頌和韓公廉在他們制造的水运仪象台里，发明和使用了一个天衡裝置。它是一个按被調整量的偏差进行調整的閉周自动調整器。

文章分析、研究了我国古代的各种类型的自动裝置，認為我国古代在自动學上的成就是很突出的。

一、指南車——方向的开周自动調整系統

我国古代发明的指南車，是采用一种能自动离合的齒輪系。它的发明年代，据傳說始于黃帝（公元前 2698~2599 年）或周公（約在公元前 1100 年）。根据刘仙洲先生之考証，認為“这些都不大可靠”。他根据汉代文献記載及出土的秦代或西汉齒輪等事实，判断指南車的发明“最早可推到西汉”（紀元前二世紀）；即使是再保守一点，也应该推到汉代張衡（公元 78~139 年）[1]。

根据以后宋史的記載 [1]，指南車是用一輛双輪独轆車組成，用馬來拉动。車廂外壳上层置有一个木刻的仙人，伸臂指向南方。車廂內有能自动离合的齒輪系等較重的机构。無論車朝那个方向轉弯，木仙人所指的方向始終是正南方。它的机械构造，由鮑思賀先生根据宋史輿服志上的詳細記載推測如图 1 所示 [1]。

图中 A 为車輪；B 为附装于車輪里側的齒輪；D 为小平輪；E 为中心大平輪，裝置在轆上的一个立軸上，其中心为 O_1 。轆則裝置在車軸中間的一个短立軸上，其中心为 O_2 。木仙人裝置在 E 輪立軸的最上端。当車一直向前走的时候，輪 D 和 E 之齿彼此恰不接触。故兩边車輪的運轉都不

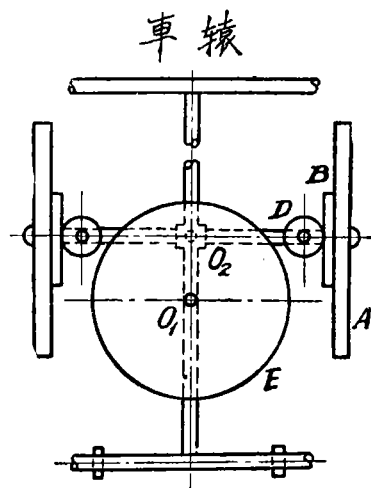


图 1 鮑思賀推測宋代燕肅在公元 1027 年所造的指南車（取自 [1]）。

本文收到日期：1963 年 4 月 1 日

影响中心大平輪 E 。此时木仙人的位置假定正指向南方。当車向左轉弯时，轆的前端向左移，轆的后端必向右移，使 E 輪和右边的 D 輪相銜接。結果 E 輪受右边車輪的影响向右轉动。其所轉角度恰能抵消車向左轉弯的影响，从而使木仙人所指的方向不变。当車向右轉弯时，理同[1]。

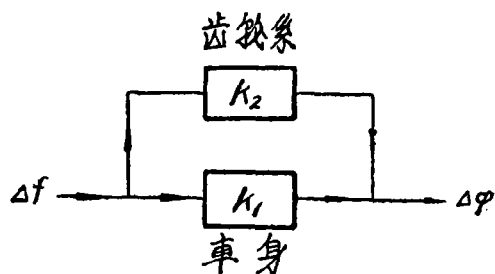


图 2 指南車自动调整系统的方框图

的方框图是类同的[2]。

系統所应用的调整原則为，按扰动作用进行调整 (принцип регулирования по возмущению) [2]。当出現扰动作用 Δf 时，系統的关系式为：

$$\Delta\varphi = K_2\Delta f + K_1\Delta f = (K_2 + K_1)\Delta f.$$

由于指南車設計、制作时保証 $K_2 = -K_1$,

$$\therefore \Delta\varphi = 0.$$

即在整个轉弯过程中方向始終不变。換言之，动态誤差和靜态誤差都等于零。所以可以認為：这里是应用了自动控制理論中絕對不变性原理的雛形，并应用了双通道結構的理論[3]。

从今天机械学的观点看来，采用齒輪系的指南車不外乎由二种原理构成：上述的补偿原理及差动齒輪原理。前者形成了开周自动調整系統，而后者形成了閉周自动調整系統。当然，应用补偿原理的齒輪系，在构造方面要远比应用差动齒輪系的方法簡單。因而，在西汉时代指南車采用差动齒輪的方法是很少可能的。所以，上述关于指南車的分析，虽是按照宋史的記載加以推測的。但是，我們有充分根据認為，汉代采用的也是类似的补偿方法。

由上述可知，这种按扰动調整原則的开周自动調整的发明和应用，在我国已經約有二千一百年以上的历史了。A. Booth 則認為中国指南車是一个閉周自动調整系統[8]，即利用偏差負反饋的調整原則。因为他錯誤地認為：它利用差动齒輪来工作的，并是紀元后第八世紀的发明（在我国周圣历三年～唐貞元十五年）。在国外有关扰动調整原則的应用，則要比我国迟一千多年。根据記載[3]，約一千年以前，阿拉伯人創造的风磨上，磨子的轉速是按外部負載力矩的作用而改变风翼来进行自动調整的。

至于按扰动調整原則在工业上的应用，根据現有資料来看，那还是較近代的事情了。法国学者 J. Poncelet 在公元 1829 年創造了一个利用这个原則的、蒸汽机的轉速調整器[2,3]。

二、水运仪象台里受水壶水重的閉周自动調整系統

北宋哲宗元祐初年（公元 1086～1089 年）苏頌和韓公廉制成了一座水运仪象台。这种

水运仪象台是用水作动力来转动一个枢轮，而后者必须作匀速迴转（每天1600周）以驱动浑象和浑仪二个齿轮系。如何保证枢轮匀速迴转呢？在汉代张衡时这个问题已经解决了。在他的水力天文仪器中利用铜壶滴漏装置。在最后一个壶（平水壶）内的水平面总保持恒定不变，这样在同一时间内由平水壶下边出水口流出的水量就能保持恆值。把这个一定的水量注入水轮（即枢轮）上，就能使后者匀速迴转。苏頌又进一步改进了这个方法，他增加了一个特殊的装置——天衡。它的构造如图3所示[1]。

图中退水壶上有一个枢轮（图上未画明），沿其轮周等距离地分布有受水壶三十六个。退水壶旁的壶架上置有平水壶、天池等滴漏装置（图上未画明）。平水壶内水面保持恆定的高度，并将平水壶向外流出的水去驱动枢轮。天衡装置由天关、左天锁、右天锁、天衡横杆（在枢轮之上），天条、格叉、关舌（在枢轮之旁）等部分组成。“当枢轮不转动的时候，它圆周上恆有一个突出部分架在格叉之上。当受水壶内接受的漏水不到一定重量的时候，天关反抗着天权和天条等重力阻止着枢轮不使它转动；到达一定的重量的时候，格叉处因压力增大而下降，同时经过天条及天衡使天关被提上升，这样就使枢轮向右转动。但转过一壶以后，格叉处所受的压力去掉，关舌和格叉等受枢轮枢权等的影响又行上升，同时经过天条及天衡又使天关下落，枢轮又被阻住。这样使枢轮的转动因漏水量的等时性也得到等时性”[1]。（这里要附带说明，原来图中横杆叫天衡。但本文作者今以天衡装置表示图上整个右侧系统）。由此可见，天衡装置是用来使每一受水壶内所盛之水有一定的重量，从而使枢轮的迴转速更加精确地保持恒定。右天锁相当于一个止动卡子，它具有防止枢轮倒转的作用。左天锁似乎是限制天关升起过高用的[1]。

今从自动调整理论的角度加以分析。显然，天衡装置是一个自动调整器。被调整量是受水壶内的水重（输出）。连接格叉及枢轮的横杆是一个槓杆，起了自动调整系统中检测、比较元件的作用。它比较了槓杆二端的重量，并且用二端重量之差（误差）来进行调整。因此枢轮的给定重量便是自动调整系统中的参据量（输入）。小槓杆所检测出来的误差，通过作为放大、变换元件的天衡横杆来控制天关。而天关则是一个两位置继电器性质的执行元件，它来控制受水壶的水重。然而，由于仪象台动作过程的需要，天关不是设计成直接来控制平水壶向外流出的水（例如利用阀门，这在当时技术条件下也是完全可以做到的），而是用来放过已达恒定水量的这一受水壶，同时让下一个空受水壶来接受水流。即使这样，这还是一个利用误差来控制的，带有负反馈的闭周自动调整系统。它的方框图表示在图4上。而后者和

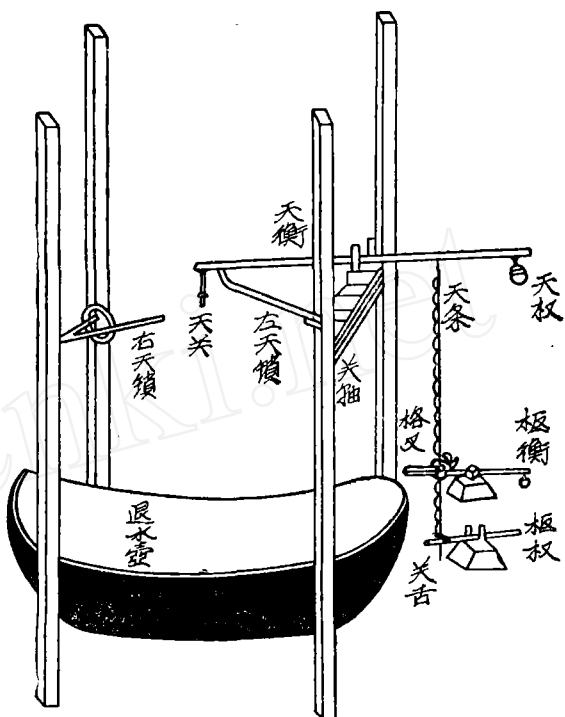


图3 苏頌：新仪象法要上的天衡图（取自[1]）

今日采用的自动调整系统的方框图完全类同[4]。

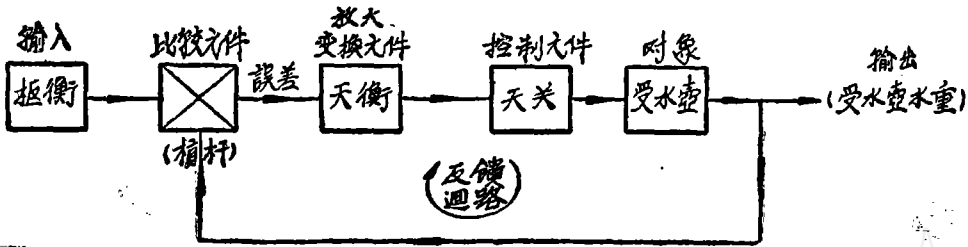


图 4 水运仪象台受水壶水重自动调整系统的方框图

这是一个直接调整的、两位置继电器式、无差、闭周自动调整系统（非线性系统）。它应用按被调整量之偏差（误差）进行调整的原则[2]。由于二个横杆在受水壶无水时，已经接近于平衡，所以这个自动调整系统具有较高的灵敏度。苏颂、韩公廉发明的天衡装置便是一个自动调整器（公元1086~1089年）。它比俄国 И. И. Ползунов 的蒸汽锅炉水位调整器（公元1765年）及英国 James Watt 的蒸汽机转速离心式调整器（公元1784年）要早近七百年[5]。

除了上述过去公认为最早的调整器外，有人提出自动调整器的发明再往前可以推到卓越的荷兰物理学家及机械师 C. Huygens。他在公元1657年所创制的时钟中采用了一个装置，以自动调整的原则来调整时钟的走动[5]。但叙述简单，无法获悉它的动作原理及应用的调整原则。

此外，还有人提出闭周自动调整系统的发明应该首推 A. Meikle。他在公元1750年发明了一个带自动转塔的风磨[6]。依靠与风向成直角的辅翼的帮助，当风向改变时辅翼能使主翼的塔转动，直到辅翼的轴与风向再成直角为止。这实际上是一个闭周自动控制系统，用来进行主翼方向的自动控制。它虽比俄国发明家 И. Ползунов 的浮子式水位调整器要早15年，但是还是远远落在苏颂等人创造的天衡装置的后面。

自然，这里没有采纳那些并无确实根据的见解。例如有人认为在公元初年时阿拉伯人已经采用浮子式阀门来自动调整水位[7]。但是，公认为没有援引确实的根据[6]。

三、我国古代在自动学上的成就是很突出的

如所周知，构成自动调整系统有三个基本调整原则：按扰动作用进行调整的原则、按被调整量之偏差进行调整的原则、以及同时实行上述二原则的复合调整的原则。按目前已收集到的不完整的资料来看，第一及第二个调整原则的发明和使用，我国远远走在其他国家的前面。

我国古代劳动人民能在自动学方面有这样杰出的创造，绝非偶然的。因为我国在过去几千年的历史里，劳动人民在科学、技术上有不少极有价值的发明创造，而且时间上都要比别的国家为早。而自动调整、自动控制等自动学方面的课题，则是人类的生产及与其相联系的科学技术，进步到一定阶段时必然会遇到的问题。由于我国古代在天文、数学、机械等自然科学方面都有突出的成就，所以在这个基础上我国古代劳动人民当时首先发明和使用自动

調整系統，這是很自然的。根據目前可以收集到的不完整的資料來看，我國古代勞動人民第一個接觸到的需要較精確自動調整——自動保持一個量為恆值——的問題，很可能就是在計時方面遇到的。這就是上文中提到的，古代我國銅壺滴漏裝置中的平水壺水位必須保持恆定的問題。這個問題的解決，根據劉仙洲先生之考證，已經約有三千年左右（我國周朝）的歷史了[1,9]。

為了保持平水壺水位的恆定，當時是使用了幾個壺，一個魚貫地依次供水給另一個（圖5）。第一個壺，每過一段時間需要由人來添加水，因此水面變動最大。而以下幾個壺的水面依次變動得愈來愈小。這未始不是一個切實的解決辦法。作為三千年以前存在的一個自動調整的方法來看，根據當時生產及科技水平來看，這實是一個非常巧妙的方法。誠然，這還不是一個閉周自動調整系統（система параметрической стабилизации）[3, 11]。如果我們把這個銅壺滴漏裝置用一個電系統加以比擬的話，那末，前

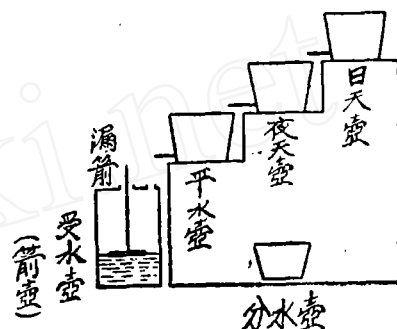


圖5 銅壺滴漏裝置示意图[9]

面連貫的三個壺相當於一個阻容濾波系統；洩溢用的分水壺猶如電阻和二極管組成的削波器中的降壓電阻。而對第一個壺間隔地加水，便相當於對電系統加上一個個電的脈衝。而整個系統的目的是為了從脈衝電源取得恆定電壓。

由此可見，從解決這一個最早面臨的需要較精確的自動調整問題迄今，已有三千年。這三千多年來我國在自動學方面的成就究竟有多少？幸喜在劉仙洲先生的中國機械工程發明史（第一編）一書中，我們看到了經過收集、整理的第一批寶貴材料。其中包括用之于水力天文儀器上的自動機構，能作種種運動的自動木人或動物，自動爆炸的地雷、水雷，自動發射箭的裝置，水飾等等。從自動學的观点加以分析，則可以分成下面幾類（當然有的還是雛形的）：

1. 自動檢測及自動傳訊。例如以銅壺滴漏裝置來計時，並且以壺箭在箭壺中浮起的高度來表明時刻，記里鼓車（公元前第二世紀）利用車輪的轉動自動地把車行的里數表示出來（打鼓及打鐘）。即在三千年前，我國古代勞動人民已經把一個物理量變換為另一物理量，並加以測定。漢張衡所創造的候風地動儀將地震加以測定，並把訊號變換、放大[12]；

2. 開周的自動控制。多半是利用類似於二位置繼電器性質的觸發元件——機關，消息、關捩來自動控制另一較大能量以完成預定動作。如明代嘉靖年間（公元1522~1566年）曾銑發明一種能自動爆炸的地雷。捕捉動物用的自動機構也屬於這一類。能作種種運動的自動木人，據說最早於二千九百多年前“周穆王”時即有了[10]。但此事今天考證起來不十分可靠。漢代及以後文獻中，不斷有有關這方面記載。根據齒輪及傳動機構的發明，在漢代已趨於完善等方面來判斷，從漢代開始出現了自動木人或動物，比較可靠；

3. 開周或閉周自動調整。指南車、天衡裝置；

4. 開周的程序控制。多半是利用齒輪系以及桿、凸輪傳動機構來完成一系列的順序的動作。如漢代張衡在他的水力天文儀器上用此法自動表示每月日數。唐代某皇后的粧具等；

5. 模擬研究法。以水力天文儀器模擬太陽、月亮、地球的运动。這事有人認為從虞舜的時候（公元前2257~2208年）就开始了[1]；

6. 参数恒定系统。如铜壶滴漏装置。

此外，还有上面种种方法的结合应用，有的还达到相当复杂的程度。但某些记载尚失之过简，还不能据此推测出设备的工作原理。例如元代郭守敬（公元1231~1316年）创制的大明殿灯漏中，利用“龙首张口转目以审平水之缓急，随珠俯仰以察准水之均调”[1]。分析这话的意思，好象平水壶之水位和注入平水壶的水流均有着自动调整。估计这里面一定是用了闭周的自动调整系统（例如浮子阀门式的水位自动调整系统）。

总之，可以断言：与当时其他国家相比，我国古代在自动学上的成就是很突出的。这一点甚至于外国某些学者也不得不承认[8]。这是一段光荣的历史。但是它远没有为许多人，特别是从事于自动学领域科技工作的人所知晓。应该继续仔细收集、整理、分析、探讨我国古代劳动人民在自动学上的成就。这不但是发掘了我国古代劳动人民的光辉成就，丰富了人类发明史上的宝贵内容，同时也可以用来教育我国的科技工作者及青年一代。

参 考 文 献

- [1] 刘仙洲：中国机械工程发明史，第一编。1962。
- [2] Ивахненко А. Г., Электроавтоматика, I. 1954.
- [3] Уланов М., Регулирование по возмущению, 1960. (扰动调节。中译本，胡保生译)。
- [4] 万百五：反再生稳压器分析，电信建设，二卷九期，1951，9月号。
- [5] Храмой А. В., Очерк истории развития автоматики в СССР, 1956.
- [6] Newton G. C., Gould L. A., and Kaiser J. F., Analytical Design of linear Feedback controls, 1957.
- [7] Usher A. P., A History of Mechanical Inventions, 1929.
- [8] Booth A. D., Progress in Automation, 1960.
- [9] 刘仙洲：中国在计时器方面的发明，天文学报，四卷二期，1956年。
- [10] 金怡：古书中的机关人，解放日报，1961年9月3日。
- [11] 伏龙诺夫：自动调整理论基础，1954。（中译本，万百五等译）。
- [12] 刘仙洲：中国在传动机件方面的发明，机械工程学报，第2卷第1期，1954。

Успехи в системах автоматического регулирования в древнем Китае

Вань Ба-у

Резюме

Статья показывает, что тележка-компас (указывающая на юг тележка), изобретённая и использованная около двух тысячелетий назад в Китае, есть разомкнутая система автоматического регулирования с принципом регулирования по возмущению. В статье рассказывается об изобретённой девятьсот лет назад при Северной Сунской династии изобретателями Су Соном и Хуэнь Гуонлиэ астрономической аппаратуре с гидравлическим приводом, в которой было балансное устройство-регулятор автоматического регулирования замкнутого цикла с принципом регулирования по отклонению регулируемой величины.

В статье анализируются и рассматриваются различного типа древние китайские устройства автоматики.

Автор в своей работе подтверждает замечательные успехи в автоматике в древнем Китае.