

我国古代自动装置的原理分析 及其成就的探讨*

万 百 五

摘 要

本文论证了约在两千年以前我们祖先所发明和使用的指南车，是一个按扰动调节原理工作的开环自动调节系统。北宋时代(九百年以前)的苏颂和韩公廉，在他们创造发明的水运仪象台里，使用了一个天衡装置，它是一个按被调量的偏差进行调节的自动调节器。文中探讨了这两个系统的结构图和传递函数。

此外，本文还介绍了铜壶滴漏装置和水运仪象台枢轮转速恒定系统，它们都是参数恒定系统，能够自动补偿某些外界扰动作用对于被调量的影响。

本文最后分析研究了我国古代各种类型的自动装置，认为可以将它们划分为自动检测与自动传送、开环自动控制、开环或闭环自动调节、开环程序控制、参数恒定系统和模拟研究等六类，从而论断：与其他国家相比，我国古代在自动学方面的成就是非常突出的。

一、前 言

我们在高等工业学校讲授自动调节理论课程过程中，每次讲到负反馈系统或自动调节器的发明及其发展历史时，照例总要介绍俄国 И. И. Ползунов 的用于锅炉水位调节的浮子-阀门式调节器和英国 J. Watt 的用于蒸汽机调速的离心式调速器，而在讲到调节原理时，也要提到 Ползунов 原理或 Ползунов-Watt 原理、Poncelet 原理。这些都是外国的东西。难道类似的较原始的自动调节器在我国古代就没有作出创造发明吗？

毛主席在《改造我们的学习》一文中曾教导我们说：我们不能“……只懂得希腊，不懂得中国，……”或“……言必称希腊，对于自己的祖宗，则对不住，忘记了。”这就是说，我们应重视祖国的科学遗产。何况，“中国是世界文明发达最早的国家之一”，“在中华民族的开化史上，有素称发达的农业和手工业，有许多伟大的思想家、科学家、发明家、……”。(毛泽东：《中国革命与中国共产党》)作者仅就初步找到的一些远非完整的资料所作的分析，即能充分说明我国古代在自动学方面的杰出成就。今将所获得的资料经过整理和分析介绍于后。在整理和分析中，曾得到清华大学刘仙洲先生的指教，谨此致谢。

二、指南车——方向的开环自动调节系统

我国古代指南车的发明，据传说始于黄帝(公元前 2698—2599 年)或周公时代(公元前 1100 年左右)。根据刘仙洲先生的考证，最早可推到西汉(公元前 200 年)，即使是再保

* 本文于 1965 年 1 月 7 日收到。

守,也应该是东汉时代(公元 78—139 年)^[3]。

根据宋史的記載^[3],指南車是用一輛双輪独轆車組成,由馬來拉动。車箱內采用一种能自动离合的齿輪系。車廂外壳上层,置有一个木刻的仙人,無論車朝那个方向轉弯,它的伸臂都指向南方。車的机械构造,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^[3]。

图中 A 为車輪, B 为附装在車輪里側的齿輪, D 为小平輪, E 为中心大平輪(装在轆上的一个立軸上,其中心为 O_1)。轆装在車軸中間的一个短立軸上,其中心为 O_2 。木仙人装在 E 輪立軸的最上端。当車一直朝前走动时, D 輪和 E 輪的齿彼此不接触,故两边車輪的轉动都不影响中心大平輪 E 。此时,木仙人假定正指向南方。当車向左轉弯时,轆的前端向左移,而后端則向右移,使 E 輪和右边的 D 輪相銜接,結果 E 輪受右边車輪的作用向右轉动,而其轉动角度則恰能抵消車向左轉的影响,从而使木仙人所指的方向不变。当車向右轉弯时,其理同前^[3]。

今从自动調节理論的角度进行分析。这是一个开环自动調节系統,被調量 φ 即是木仙人所指的方向。这个系統保證了車向任何方向轉弯时(即有扰动作用 Δf 时),被調量 φ 不变。它的方框图如图 2 所示。显然,这个方框图和近代按扰动原理工作的調节系統方框图是一样的^[4]。

当出現扰动作用 Δf 时,

$$\Delta\varphi = k_2 \Delta f + k_1 \Delta f = (k_2 + k_1) \Delta f,$$

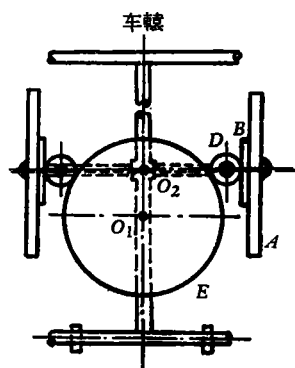


图 1. 鮑思賀推測宋代燕肅在公元 1027 年所造的指南車^[3]

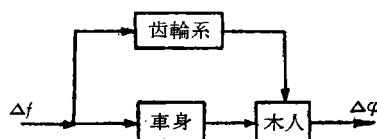


图 2. 指南車自动調节系統的方框图

式中 k_1 为車轉弯时影响方向 φ 的传递系数, k_2 为車轉弯时通过齿輪 B , D , E 影响方向 φ 的传递系数。由于在設計制造时保證了 $k_2 = -k_1$, 故

$$\Delta\varphi = 0,$$

即在車整个轉弯过程中,方向 φ 始終保持不变,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。

从今天的机械学观点来看,采用齿輪系的指南車不外乎由两种原理构成,即上述的补偿原理和差动齿輪原理。前者形成了开环自动調节系統,而后者則形成闭环自动調节系統。当然,应用补偿原理的齿輪系,在构造方面要比应用差动齿輪系簡單得多,在西汉时代,在指南車中采用差动齿輪原理是不大可能的,但是我們有充分根据認為汉代在指南車中采用了类似的补偿方法。

由上述可知,这种按扰动調节原理构成的开环自动調节系統,在我国已經有了 2100

年以上的历史。国外自动学学者 A. Booth 曾錯誤地认为指南車是利用差动齿輪工作,并且是发明于公元第 8 世紀(周圣历 3 年—唐貞元 15 年)^[5],从而錯誤地判断我国指南車是一个閉环自动調节系統,即采用偏差負反饋的原理。国外在有关按扰調节原理的应用方面,要比我国迟一千多年。根据記載^[4],約在一千年以前,阿拉伯人曾創造一种风磨,磨子的轉速是按外部負載力矩作用改变风翼来进行自动調节的。至于按扰調节原理的工业上的应用,則根据現有資料来看,还是比較近代的事情。公元 1829 年,法国学者 J. Poncelet 創造了一种按扰調节原理工作的蒸汽机轉速調节器^[4]。

三、水运仪象台受水壶水重的閉环自动調节系統

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。这是一种水力天文仪器,其中用水作动力来轉动一个枢輪,而后者必須作恆速迴轉(每天 400 周¹⁾),以驅动渾象和渾仪两个齿輪系。如何保証枢輪恆速迴轉,东汉时代的张衡已經解决了这个問題。在他的水力天文仪中曾利用了銅壶滴漏装置。在这个装置最后一个壶(平水壶)內的水面始終被保持恆定不变,这样,在同一時間內由平水壶下边出水口流出的水量就能被保持恆值。把这个壶的一定的水量注入水輪(枢輪),便能使后者恆速迴轉。苏頌又进一步改进了这个装置,他增加了一个特殊設備——天衡,其构造如图 3 所示^[6]。

图中退水壶上有一个枢輪(图上未画出),沿其輪周等距离地分布有受水壶 36 个。在退水壶的壶架上,置有平水壶、天池等滴漏装置(图上未画出)。平水壶內的水面高度保持恆定,并使其向外流出的水去驅动枢輪。天衡由天关、左天鎖、右天鎖、天衡橫杆(在枢輪之上)、天条、格叉、关舌(在枢輪之旁)等部分组成。当枢輪不轉动时,它的圓周上恆有一个突出部分架在格叉(和关舌)上。在受水壶內接受的漏水未达到一定重量时,天关由其自身重量(比天衡橫杆右端重)作用而下落,并反抗天权和天条等重力阻止枢輪轉动;而当壶內接受的漏水达到一定重量时,格叉处因压力增大而下降,同时通过天条及天衡使天关被提上升,这样,就使枢輪向右轉动。但轉过一壶后,格叉处所受压力被去除,关舌和格叉等受枢衡、枢权等影响

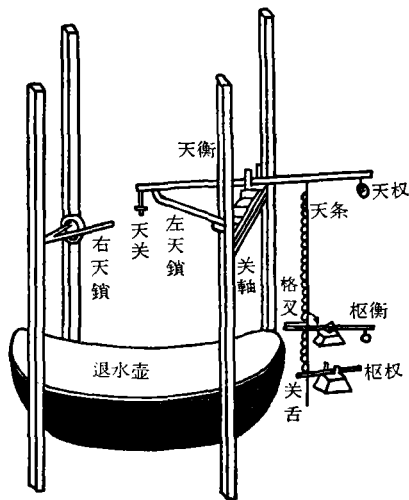


图 3. 苏頌的“新仪象法要”上的天衡图

又行上升,更主要的是天关由于其本身重量的作用而下降,于是枢輪又被阻止轉动。“这样就使枢輪的轉动因漏水量的等时性也得到等时性”^[3](这里需附带說明的,即原来图中的橫杆称为天衡,但今以天衡装置表示图上的整个右側系統)。由此可见,天衡装置是用来使每一受水壶內所盛之水有一定的重量,从而使枢輪的轉速更加精确地保持恆定。右天鎖相当于一个止动卡子,它具有防止枢輪倒轉的作用。左天鎖似乎是作限制天关升起

1) 枢輪迴轉数系由刘仙洲先生推算而得,其中并作了一些假定。在[3]中,他推算为 1600 周,经与他讨论后,现修改为 400 周。

过高用的^[3]。关舌和枢权等似乎是作限制格叉升起过高用的，协助稳定天衡的运动和枢轮的步进式转动。在图4上示出了枢轮转速恒定系统的示意图^[11]。

今从自动调节理论进行分析，显然，天衡装置是一个自动调节器，被调量是受水壶内的水重，连接格叉及枢衡的横杆是一个小杠杆，它起着自动调节系统中检测、比较元件的作用，比较杠杆两端的重量，并用两端重量之差(误差)进行调节。枢衡的给定重量则是自动调节系统中的参考量(输入)。小杠杆所检测出的误差，通过作为放大和变换元件用的天衡横杆来控制天关，而天关则是一个双位置继电器性质的执行元件，用来控制受水壶的水重。但由于仪象台动作过程的需要，天关不是被设计成用来直接控制平水壶向外流出的水量(例如利用阀门，这在当时的技术条件下，也是完全可以做到的)，而是用来放行已达到恒定水量的受水壶，并让下一个空受水壶接受水流。即使是这样，这还是一个利用误差进行控制的带有负反馈的闭环调节系统。它的等效方框图示于图5中。显然，这个方框图与今日采用的自动调节系统的方框图完全类同。系统中，下一个空受水壶的换入，可以认为是系统所接受到的外界扰动作用。

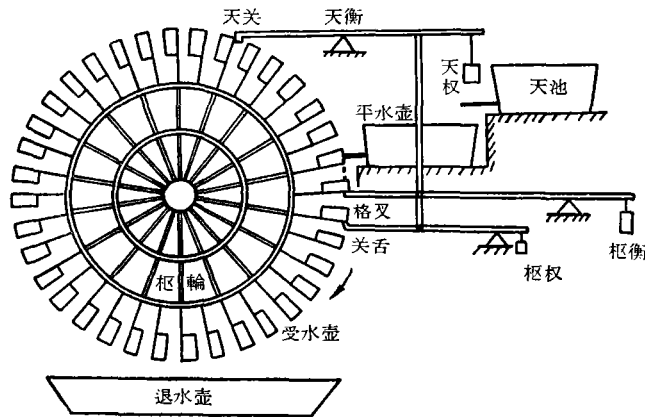


图4. 枢轮转速恒定系统示意图

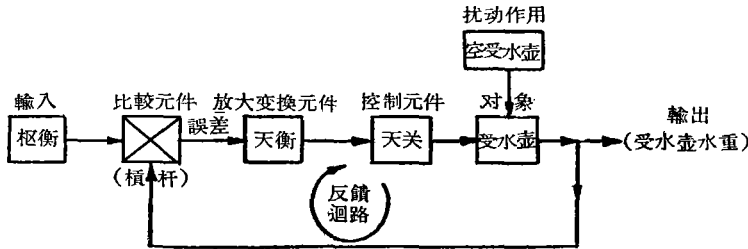


图5. 水运仪象台受水壶水重自动调节系统的等效方框图

作为检测、比较元件的小杠杆还是一个比例环节，它的传递函数为 k_1 。天衡杠杆是一个传递函数为 k_2 的比例环节。天关是一个非对称单值两位置继电器式元件，它的输出与恒速水流的流量相关。受水壶组成一个积分环节，它的传递函数为 $1/Ts$ ，其中 s 为拉氏变换的复变数。实际上，格叉处承受了受水壶水重的一部分，所以在反馈回路中有一个反

饋元件，它是一个传递函数为 k_3 的比例环节。自动调节系统的等效结构图示于图 6 上。

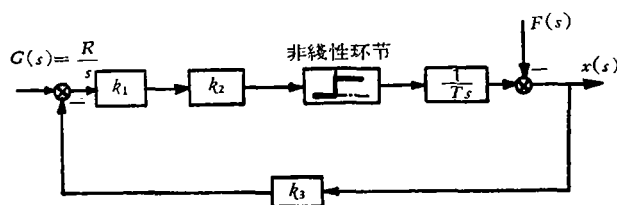


图 6. 受水壶水重自动调节系统的等效结构图

这是一个直接调节的两位置继电器式无差闭环自动调节系统（非线性系统），它应用按被调量偏差进行调节的原理。系统是稳定的，不会产生自振荡。由于两个杠杆在受水壶无水时，已经接近于平衡，故这个自动调节系统具有较高的灵敏度。苏颂和韩公廉发明的天衡装置要比俄国 Ползунов 的蒸汽锅炉水位调节器（公元 1765 年）和英国 Watt 的蒸汽机转速离心式调节器（公元 1784 年）早七百年左右。

除了上述过去被公认为最早的调节器外，有人还提出自动调节器的发明人可以再往前推到卓越的荷兰物理学家及机械师 C. Huygens。他在公元 1657 年创制了一种时钟，但叙述简单，无法获悉这种时钟的动作原理。

此外，还有人提出闭环自动调节系统的创制应该首推 A. Meikle。他在公元 1750 年发明了一个带有自动转塔的风磨^[8]。依靠与风向成直角的辅翼的帮助，在风向改变时能使主翼的塔转动，直至辅翼的轴与风向再成直角为止。实际上这是一个闭环自动控制系统，用来进行主翼方向的自动控制。它虽比俄国发明家 Ползунов 的浮子式水位调节器早 15 年，但还是落在苏颂和韩公廉的天衡装置的后面。

当然，这里没有采纳一些尚无确实根据的见解。例如有人认为公元初年时阿拉伯人就已采用浮子式阀门作水位的自动调节^[9]。因为没有援引确实的根据^[8]，难以置信。

四、两个参数恒定系统

根据目前收集到的不完整的资料来看，我国古代劳动人民首先接触到的需要较精确的自动调节（自动保持一个量为恒值）问题，很可能是在计时方面所遇到的问题。这就是上节中提到的我国古代铜壶滴漏装置中的水壶水位需保持恒定的问题。这个问题的解决，根据刘仙洲先生的考证，已经有三千年左右的历史^[3,10]。

为了保持平水壶水位的恒定，当时在这个装置中使用了几个壶（参看图 7）。第一个壶，每隔一段时间需由人添加水，因此水位变动最大，而以下几个壶的水位变动则依次愈来愈小。根据当时的生产及科学技术来看，这实在是一个非常巧妙的方法。

铜壶滴漏装置中的壶数有多到四个的（如图 7 所示），也有少到两个的。当然，以壶数多的更能准确保持平水壶的水位，但也不用太多，用上四个也就足够了。因为平水壶上有一个上出水口，多余的水会随时自动地泄入下面的分水壶，使水面高度不超过上出水口的底边；而且据刘仙洲先

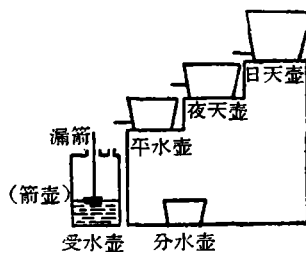


图 7. 铜壶滴漏装置示意图^[10]

生的研究,每个壶的容积都自下而上逐个增大,滴漏用的出水管也逐个加大直径,这样就保证有充足的供水,使平水壶内水面不会低于上出水口的底边,总保持一定的水面高度,从而保证了计时精度。这个装置的计时精度,要比采用浮子阀门来调节水位的系统^[8]更高。

诚然,这还不是一个闭环自动调节系统,但它的工作原理等于近代的参数恒定系统^[4]。如果我们用一个电系统来加以比拟的话,则前面连贯的三个壶相当于一个阻容滤波系统,泄溢用的分水壶,犹如由电阻和二极管组成的削波器中的降压电阻,而对第一个壶每隔一段时间加水,便相当于对滤波系统加上电的脉冲。整个系统的目的犹如是为了从脉冲电源取得恒定电流。

现在,我们来研究水运仪象台里将枢轮转速保持为恒定的系统,它的示意图表明在图4上。

由于空受水壶是不断地逐个依次换入,充水过程是重复地进行,因此在格叉处所承受的

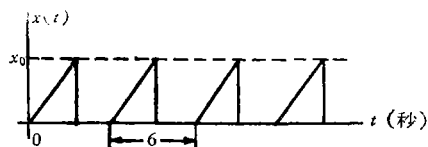


图8. 格叉处所受的水重 $x(t)$

的水重 $x(t)$ 便如图8所示的锯齿波形。根据枢轮转速为每天400周,枢轮上共有36个受水壶,可以算出水重 $x(t)$ 的锯齿波形周期

$$T = \frac{24 \times 60 \times 60}{400 \times 36} = 6 \text{ 秒.}$$

同时可知,图3中的格叉和天关等处也都作锯齿波形的运动。形成这种运动的原理,和现今锯齿波发生器中所应用的原理是十分相似的。

另一方面,每个受水壶一直要转到一定的位置才将水完全泄入退水壶。在这以前,每个受水壶从盛满水到泄完水要转过 $1/4$ 以上的枢轮圆周,即经过九个以上的锯齿波周期。这样,每一壶水所形成的驱动转矩便在九个以上的周期中起作用。为简单起见,假定受水壶内的盛水在这个过程中均匀地泄完,于是可确定枢轮合成驱动转矩的变化是在一个常量(恒定转矩)上迭加一个三角波^[2]。在格叉等处,枢衡等对枢轮提供了一个恒阻力矩,当合成驱动转矩大于此恒阻力矩时,天关才被提起,从而才能使枢轮转动。但在枢轮转动后,有一些受水壶将泄出部分水量或泄完全部水量,因此合成驱动转矩又被减少(这相当于一个负反馈作用),当小于恒阻力矩时,枢轮又被天关所阻住。此时,下一个空受水壶开始接受水流,于是合成驱动转矩又逐渐增加,……。如此循环不已,形成一个自振荡过程,使枢轮在每个周期6秒内转动一步,即产生一个固定的角位移

$$\theta = \frac{360^\circ}{36} = 10^\circ,$$

从而保证了枢轮转速恒定。

由此可知,整个枢轮转速恒定系统是一个采用内部负反馈并进行自振荡的系统,在这个系统中的自振荡,其作用原理很类似今日电铃和钟表中产生等幅自振荡所使用的原理。刘仙洲先生曾正确地指出^[3]:“天衡装置的构造和作用已相当于后来西洋钟表的擒纵器或卡子的作用”。枢轮转速恒定系统中的这种自振荡,和一般非线性闭环自动调节系统会发生的自振荡是一样的,因此这个系统有些象目前广泛应用的振动式自动调节系统。虽然还不能认为它已是一个闭环自动调节系统,但可用来补偿枢轮摩擦转矩变动对转速的

影响。至于枢輪轉速(亦即轉速恆定系統振蕩周期)的精調,則可借助于移动枢衡、天权和枢权在杠杆上的位置来实现。

总结以上可知,6秒的振蕩周期就当时的技术水平而言不能說是較长的,枢輪每步所轉的角度也較小,这就为庞大的水运仪象台(高达12米)的杠杆系統的灵敏度和各部分的摩擦等,提出了較高的要求。中国历史博物館在王振鐸先生指导下复原按比例縮小的水运仪象台时,曾証实要使仪象台枢輪正常工作也不是易事。整个枢輪轉速恆定系統是一个具有負反饋的参数恆定系統,利用了非对称繼电器特性的元件(天关)。借助于系統中的自振蕩,使枢輪成为步进式轉动,从而較精确地保持其轉速为恆定,不受或少受轉矩变动的影响。这对当时的技术水平而言,确是一个非常杰出的創造发明。它比在此以前仅用平水壶的水流注入枢輪以維持轉速恆定,是一个很大的进步。

五、結論——我国古代在自动学方面的成就是非常突出的

如所周知,构成自动調节系統有三个基本調节原則,即按扰动作用进行調节、按被調量的偏差进行調节以及同时实现上述两原則的复合調节。按目前所收集到的远非完整的資料来看,头两个調节原則的发明和使用,我国都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成就,是絕非偶然的。我国劳动人民在过去几千年历史中在科学技术上,例如在天文、数学和机械等自然科学方面都有突出的成就,并有不少极有价值的創造发明多比別的国家早,而自动学方面的課題,如自动調节、自动控制等,則是人类的生产及与其相联系的科学技术进步到一定阶段会必然遇到的問題,故在这个基础上,我国古代劳动人民首先发明和使用了自动調节系統和各种自动装置,就是很自然的事了。

从解决最早需要較精确的自动調节問題——銅壶滴漏装置中平水壶水位的自动調节問題算起,迄今已有三千年的历史了。在这三千年的历史中,我国劳动人民在自动学方面的成就究竟有多少,这是一个值得深入研究、探討的問題。在刘仙洲先生的“中国机械工程发明史”(第一編)一书中,我們看到了經過收集整理后的第一批宝貴資料,其中包括用于水力天文仪器上的自动机构、能作种种运动的自动木人或动物、自动爆炸地雷和水雷、自动发射装置、水飾等。現从自动学的观点来加以分析,則可分成以下六类(当然有的还是雛形的)。

1. 自动检测和自动传送 例如用銅壶滴漏装置計时,并以壶箭在箭壶中浮起的高度表明时刻;在記里鼓車(公元前第二世紀)中利用車輪的轉动自动地把車行的里程表示出来(打鼓及打鐘)等。即在三千年以前,我国古代劳动人民就已能把一个物理量变换为另一物理量并加以測定。东汉时代的张衡創造了候风地动仪,能将地震加以測定,并把信号加以变换和放大^[12]。

2. 开环自动控制 多半是利用类似于两位置繼电器性质的元件——机关、消息、关捩来自自动控制另一能量較大对象以完成預定动作。如明代嘉靖年間(公元1522—1566年)曾銑发明了一种能自动爆炸的地雷。捕捉动物用的自动机构也属于这一类。能作种种运动的自动木人,据說早在二千九百多年前周穆王时代就有了^[3],但此事今天考証起来不十分可靠。汉代及以后的文献中,不断有有关这方面的記載。根据齿輪及传动机构的发明

在汉代已趋于完善等来判断,从汉代开始出现了自动木人或动物是比较可靠的。

3. 开环或闭环自动调节 例如指南车和天衡装置等。

4. 开环程序控制 多半是利用齿轮系以及杆、凸轮传动机构来完成一系列顺序的动作,如张衡在他的水力天文仪器上曾用此法自动表示每月日数等。

5. 参数恒定系统 如铜壶滴漏装置、枢轮转速恒定系统等。

6. 模拟研究 如在水力天文仪器里,用齿轮系模拟太阳、月亮和地球的运动。这是一种简单的数学模拟。据考证,这种方法在虞舜时代(公元前 2257—2208 年)就已开始应用了^[3]。

此外,还有上述方法的结合应用,有的还达到相当复杂的程度。但是由于某些记载尚失之过简,不能据以推知其工作原理。例如在元代郭守敬(公元 1231—1306 年)创制的大明殿灯漏中,曾利用“龙首张吻转目以审平水之缓急,随珠俯仰以察准水之均调”^[3]。分析这句话的意思,好象平水壶的水位和注入平水壶的水流均进行了自动调节,至少已经能够自动指示工作情况(即进行自动核测)。估计也有可能利用了闭环自动调节系统(例如利用了浮子阀门式的水位自动调节系统),作者对此曾作了设想和推测^[2]。

总之,可以断言我国古代在自动学方面的成就,与当时其他国家相比是非常突出的。这一点甚至连外国的某些学者也不得不承认^[5]。我们应该继续仔细地收集整理和分析探讨我国古代劳动人民在这一方面的成就;这不但是为了发掘我国古代劳动人民的光辉成就,丰富人类科学发明史的宝贵内容,用来教育我国的科学技术工作者和青年一代,也有可能从中找到一些值得我们今天要加以继承的科学技术成就。

参 考 文 献

- [1] 万百五,我国古代在自动调整系统方面的成就,西安交通大学学报,1963年,第3期。
- [2] 万百五,我国古代在自动调整系统方面的成就(补遗),西安交通大学学报,1964年,第4期。
- [3] 刘仙洲,中国机械工程发明史,第一编,科学出版社,1962年。
- [4] Уланов, М., Регулирование по возмущению, Госэнергоиздат, 1960 (中译本:扰动调节,胡保生译)。
- [5] Booth, A. D., Progress in Automation, Butterworths Scientific Publications, London, 1960.
- [6] (宋)苏颂,新仪象法要(三卷),守三阁丛书子部,(清)钱熙祚校。
- [7] Храмой, А. В., Краткий очерк развития автоматки в СССР, Изд. АН СССР, 1956.
- [8] Newton, G. C., Gould, L. A. and Kaiser, J. F., Analytical Design of Linear Feedback Controls, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1957.
- [9] Usher, A. P., A History of Mechanical Inventions, McGraw-Hill Book Company, 1929.
- [10] 刘仙洲,中国在计时器方面的发明,天文学报,1956,第2期。
- [11] Needham, J., Ling, W. and Price, D. J., Chinese Astronomical Clockwork, *Nature*, 177 (1956), March, 31.
- [12] 刘仙洲,中国在传动机件方面的发明,机械工程学报,1954年,第1期。
- [13] 金 怡,尚书中的机关人,解放日报,1961年9月3日。
- [14] Bellman, R. E. and Dreyfus, S. E., Applied Dynamic Programming, Princeton University Press, 1962.

ON CERTAIN AUTOMATIC EQUIPMENTS IN ANCIENT CHINA—A DISCUSSION OF THEIR PRINCIPLES AND ACHIEVEMENTS

VAN BE-WU

In this paper it is demonstrated that the south-pointing-chariot invented about two thousand years ago is an open-loop regulating system based on the disturbance compensation principle. And about nine hundred years ago in North-Song Dynasty, Su Sung and Han Kung-lien built a water-powered astronomical apparatus, in which a balancing device, an automatic controller activated by the error of the regulated variables, was used. The block diagrams and transfer functions of these two systems are given in this paper.

Two parameter stabilizing systems, namely, the water clock and the constant speed driving system in the water-powered astronomical apparatus are also introduced. In both cases, the influence of the external disturbances upon the stabilized variables are automatically compensated.

The author analysed the various automatic equipments in Ancient China and grouped them into six classes: automatic transducing and signalling system, open-loop control system, open and closed-loop regulating system, open-loop programming system, parameter stabilizing system and simulation of the systems. It is concluded that achievements in automatics in Ancient China was quite significant compared with the situation then existing in other countries.