

话说指南车及其所应用的不变性原理

万百五 西安交通大学 系统工程研究所



图1 指南车复原模型

相传4000多年前黄帝与蚩尤大战时黄帝的军队在山中遇到了大雾，迷失了方向。借助军师风伯设计的“指南车”（图1），军队走出大雾，大败了蚩尤。这段传说出自晋朝惠帝（公元259–307年）时崔豹所著的《古今注》。原文说：“黄帝与尤战于涿鹿之野，尤作大雾，军士皆迷，故作指南车以示四方，遂擒尤而即帝位”。图2是画家李乃慰描绘这场大战的作品，并有战车出现。

这里有几点值得注意：当时“车”有没有发明？后文将要讲到，指南车的构造是基于车上的一个较复杂的齿轮系。那么什么时候发明了齿轮？什么时候有可靠的有关“指南车”的记载？

图2 黄帝借助指南车战胜蚩尤





图3 中国科学技术史权威李约瑟

据中国科学技术史权威、英国的李约瑟（Joseph T·M·Needham, 1900–1995）考证的结论（图3）：约在4500–3500年前，中国出现了第一辆车子。而《左传》中提到，车是夏代初年的奚仲发明的。如果记载属实，那是4000年前的事情。比黄帝要迟一些。至于齿轮，远在2400多年前的东周时代，我国已经有了铜铸的齿轮。山西侯马东周晋国铸铜遗址就曾经发现成套的齿轮陶范（铸造青铜器的陶制范模），有不同规格的4套，齿轮中间有孔，周围8个齿。这是迄今所知最早的齿轮铸件。这表明黄帝时代就有基于齿轮系的指南车的说法，是缺乏根据的。

而指南车的出现，在正史和野史中都有记载。据史书记载东汉张衡（公元78–139年）、三



图4 燕肃在研究潮汐

国时代魏国的马钧、南齐的祖冲之都曾研制过指南车。但《宋史·舆服志》中记载北宋官员兼科学家燕肃（公元961–1040）（图4）所制造的指南车，对其构造和各齿轮大小和齿数都有详细记载。但是，当时史书上未附有这些齿轮如何配置、如何相互契合的构图（现称“机械制图”）。所以有些近代机械专家如鲍思贺等对此进行了推测。后来1937年我国著名科技史学家、博物馆学家王振铎（1911–1992）复原而制成了模型，见图1，存放在中国历史博物馆。

因为中国先民们发现磁石较早。所以，黄帝军师可能采用的是：一根蚕丝吊着中点、能横浮在空间的小条形天然磁石（磁铁）片——指南针的雏形（宋朝科学家沈括《梦溪笔谈》）。

1. 中国四大发明

指南车和指南针都是中国古代的发明，很容易引起混淆。这两者是不同的，虽然功能上有相似之处。

中国古代有四大发明，它是指：造纸术、指南针（又名“司南”）、火药和活字印刷术。此说法最早由李约瑟提出并为后来许多中国历史学家所继承。普遍认为这四种发明对中国古代的政治、经济、文化的发展产生了巨大的推动作用，并且这些发明经由各种途径传至西方，对世界文明发展也产生了很大的影响。

目前的司南模型（图5）是由王振铎根据东汉时期思想家王充写的《论衡》中的记载，考证并复原的。王振铎曾为复原中国古代科技发明而建立了一些模型，这是他的重要贡献。他的司南复原模型由青铜盘和天然磁体制成的磁勺组成，青铜盘上刻有二十四向（方位），置磁勺于盘中心圆面上，静止时勺尾指向为南。

那么指南车是什么？基于什么原理？



图5 司南（王振铎复原的模型）



图6 差动齿轮

2. 基于差动齿轮推测的指南车

指南车是中国古代用来指示方向的一种具有齿轮系装置的车辆。关于指南车的发明有许多传说和记载。如前文所言，《后汉书》对张衡制造指南车有简短记载。

李约瑟等国外学者根据中国古代的记载推测，指南车利用的是差动齿轮。图6所示为具有行星齿轮的差动齿轮。它的作用是测出指南车左和右两轮的转速之差。这个差由第三轴（图6右下轴）的转动表示出来，表明车辆转了弯，也就是车厢站立的木仙人所指的方向有了误差。其余的齿轮组成控制部分，即依据此误差来转动木仙人的轴，使其恢复到原来的位置。即木仙人所指的方向不变。

上海机械学院颜志仁根据后汉书的简短记载，在1984年构思了这类指南车的构造，认为控制部分要连到差动齿轮的星轴（第三轴）上，并进行了复原，见图7和图8。他认为差动齿轮测出的是方向误差。因而，这是一个利用误差控制的、负反馈的闭环控制系统，其方框图见图9。

因而，在20世纪50-60年代，李约瑟就认定指南车是世界上第一个自动控制（调节）系统。

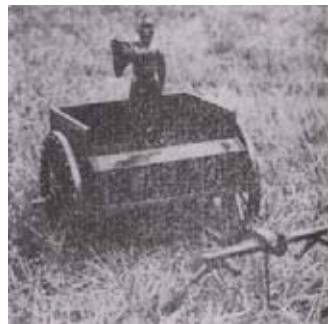


图7 颜志仁复原的基于差动齿轮的指南车模型

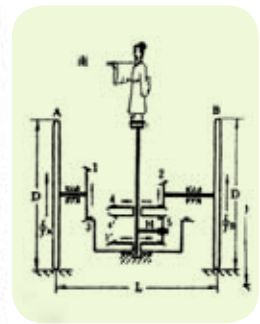


图8 左图的机械结构齿轮的指南车模型

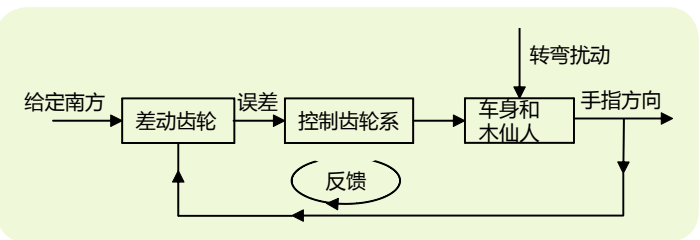


图9 基于差动齿轮测出误差的指南车闭环自动控制系统框图

3. 基于扰动补偿推测的指南车

上文所说的《宋史·舆服志》中有关指南车的记载具体如下。《宋史》卷一百四十九志第一百零二 舆服一：“……指南车，一曰司南车。

赤质，两箱画青龙、白虎，四面画花鸟，重台，勾阑，镂拱，四角垂香囊。上有仙人，车虽转而手常南指。一辕。凤首，驾四马。驾士旧十八人，太宗雍熙四年，增为三十人。……用独辕车，车箱外笼上有重构，立木仙人于上，引臂南指。用大小轮九，合齿一百二十。足轮二，高六尺，围一丈八尺。附足立子轮二，径二尺四寸，围七尺二寸，出齿各二十四，齿间相去三寸。辕端横木下立小轮二，其径三寸，铁轴贯之。左小平轮一，其径一尺二寸，出齿十二；右小平轮一，其径一尺二寸，出齿十二。中心大平轮一，其径四尺八寸，围一丈四尺四寸，出齿四十八，齿间相去三寸。中立贯心轴一，高八尺，径三寸。上刻木为仙人，其车行，木人指南。若折而东，推辕右旋，附右足子轮顺转十二齿，击右小平轮一匝，触中心大平轮左旋四分之一，转十二

齿，车东行，木人交而南指。若折而西，推辕左旋，附左足子轮随轮顺转十二齿，击左小平轮一匝，触中心大平轮右转四分之一，转十二齿，车正西行，木人交而南指。若欲北行，或东，或西，转亦如之。诏以其法下有司制之”。

下文介绍工程师鲍思贺对宋代燕肃公元1027年所造指南车原理的推测。

指南车是一种由马拉动的双轮独辕车，车箱上立一个伸臂的木仙人。车箱内装有能自动离合的齿轮系。当车子转弯偏离正南方向时车辕前端就顺此方向移动，而后端则向反方向移动，并将传动齿轮放落，使车轮的传动带动木仙人下的大齿轮向相反方向转动，恰好抵消车子转弯产生的影响（见图10前视图及图11俯视图）。车向正南方向行驶时，车轮和木仙人下的大齿轮是分离的，木仙人指向不变。因此，无论车转向何方，都能使木仙人的手臂始终指向南方。本文标题下为其复原后的模型（图1）。图12所示为中国历史博物馆展览品：由电池驱动的指南车模型在轨道上连续绕圈运行其木仙人所指方向不变。

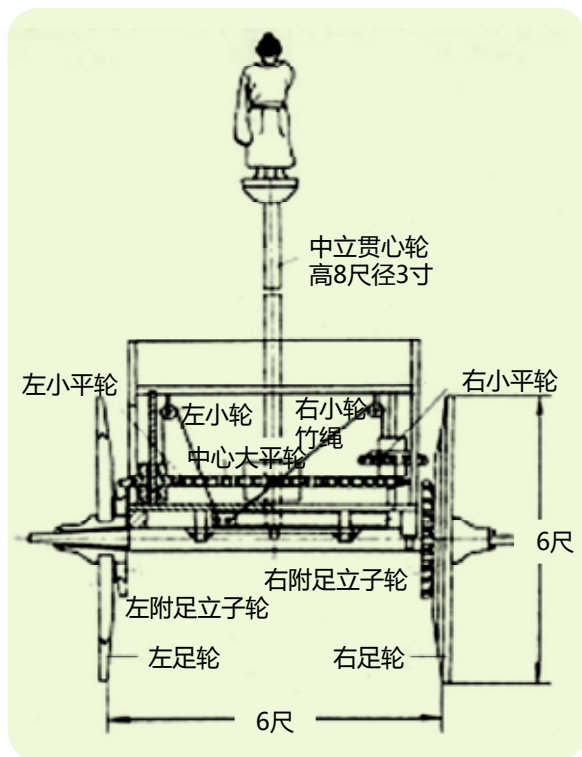


图10 鲍思贺推测宋代燕肃所造指南车的前视图

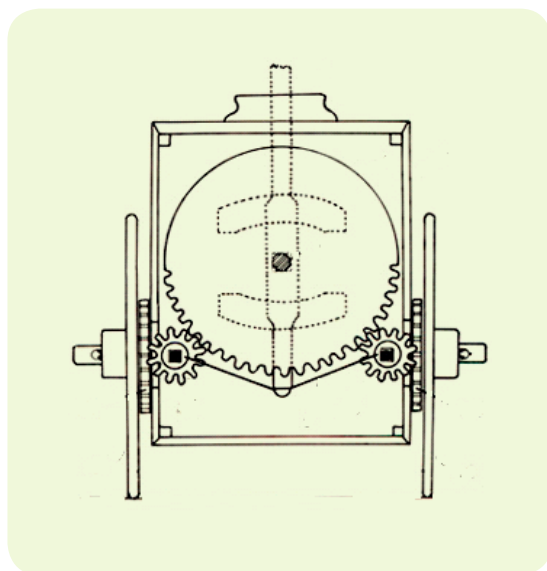


图11 燕肃所造指南车的俯视图

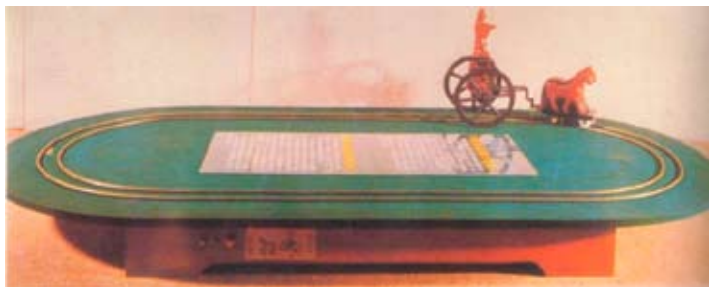


图12 指南车模型在轨道上连续绕圈运行图

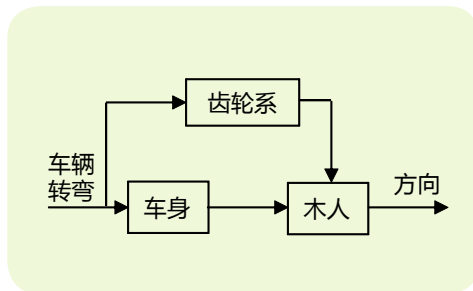


图13 指南车工作原理框图

4. 扰动补偿和不变性原理

从系统和控制的角度分析,指南车是一个保持方向恒定的自动装置,更具体说是自动调节方向的系统。被调量是木仙人所指的方向,车辆向任何方向转弯时(出现对被调量的扰动作用时),站立车厢的木仙人所指的方向也欲变动,但同时被齿轮系的反向转动所补偿而不变。它的方框图如图13所示。值得注意的是,图中从扰动(车辆转弯)到被调量(木仙人所指反方向)存在两条通道:上一条经过齿轮系,下一条经过车身和木仙人。两通道的作用相反,互相抵消(补偿)。这样奇妙的“双通道”构思出现在11世纪的中国,真是太令人不可思议了!

与指南车是基于具有行星齿轮的差动齿轮原理的观点不同,本文作者认为,上述鲍思贺推测宋代燕肃所造指南车利用的是一个独创的差动系统。体现在图10中车转弯时车辕前端的移动及后端的反向移动,这是一种对两轮转速差的测量。然后通过车辕尾端所连的挂索放落左小轮(或右小轮),而且有极性(左上右下,或左下右上)。这整体是一个差动装置。在形成车辆转弯的同时,左小平轮(或右小平轮)与中心大平轮的齿挂上,提供对木仙人转动的补偿作用。这是世界上第一例利用扰动补偿保持系统被调量为恒值。这是一个开环系统,不是传统意义上的误差

反馈的闭环自动控制系统。

在19世纪,法国数学家兼工程师J·V·彭赛列(Poncelet, 1788—1867)(图14)为了改善由英国机械师兼发明家瓦特的蒸汽机速度的控制品质,针对系统的控制滞后的缺陷,提出了改进方案:特点是直接测量蒸汽机的负载(扰动),在它还没有影响蒸汽机的速度之前调整蒸汽流量,来补偿负载变动,使速度尽量不变或少变。彭赛列虽然给出了设计方案,却没能实施。他的思想也就是上文所说的扰动补偿。显然,这和蒸汽机增加了离心式飞锤调速器的调速自动控制系统不同,后者是出现速度误差后,由误差通过调速器来控制,力图消灭误差。

一百年后,1939年苏联学者Г·В·谢巴诺夫(Щипанов)在彭赛列研究的基础上,首先提



图14 法国数学家兼工程师J·V·彭赛列

出并发展了自动控制系统中的不变性原理（俄文是 принцип инвариантности，英文是 invariance principle），意图通过对扰动的测量，对它的影响进行补偿，使被控对象的被调量不变或近似不变。20世纪40-50年代苏联院士Н·И·卢静（Лузин）、Б·Н·彼得罗夫（Петров）等对此进行了系统的研究，使之发展成为一整套完整的理论。20世纪60年代流行于苏联的双通道控制就是基于不变性原理的技术。本文作者则早在1965年就应用不变性原理和双通道技术来解释、分析燕肃指南车的原理（图13）。

5. 对两种指南车原理推测的比较和分析

本文认为指南车基于差动齿轮的推测，值得商榷。一是它根据史书等著作上有关张衡的记载，这些根据看来不够充分，二是与《宋史·舆服志》记载的齿轮系及鲍思贺的推测与图8不符，三是还没有证据表明汉代已发明了差动齿轮。这个观点本文作者在1965年已经阐明了。

本文作者是指南车基于扰动补偿观点的提出者。这个观点被国内众多学者所接受。事过50年回顾这一观点，不论是利用差动齿轮，还是利用独创的“差动系统”，两种不同观点的差别是：指南车动作原理到底是基于误差反馈，还是扰动补偿？

按照自动控制原理：在自动控制系统中除输入作用外的一切能使被控制量偏离输入作用所要

求的值或规律的系统内外的物理量，称为扰动（见图9）。像颜志仁给出的图8那样测量两轮转速之差，也即是测量车身的转弯，在控制齿轮未开始动作的情况下也是测量车身上木仙人指示方向的误差。但是，就车身转弯而言，将它处理成扰动合乎上述扰动的定义。

图8和图10的不同齿轮系，都是测量车身的转弯，本文作者的指南车基于扰动补偿的观点把车身转弯处理成扰动。总之，关键是车身转弯到底是扰动还是误差？应该看到，这个系统元件比较少、简单，扰动量又等于误差量，容易引起混淆。但推断是扰动比较恰当。欢迎有兴趣的读者参加讨论。

当然，针对上述《宋史·舆服志》的引文，国内外学者们对指南车上的齿轮系描述有不同的理解和解释，因而推测出种种不同的机械结构，但这并不影响对自动控制的原理的分析（图9）。

6. 不变性原理及其应用

为了对一个对象进行控制，需要有一个“正向通道”（图15下方）：从给定环节经过控制器、放大环节、执行环节到被控对象。

扰动的出现使对象输出偏离给定输入作用所要求的值或规律。这是扰动（经过被控对象内部）到输出的第1个通道。假定其性质是负的，即扰动的增加使输出减少（见图15被控对象上的“-”号）。

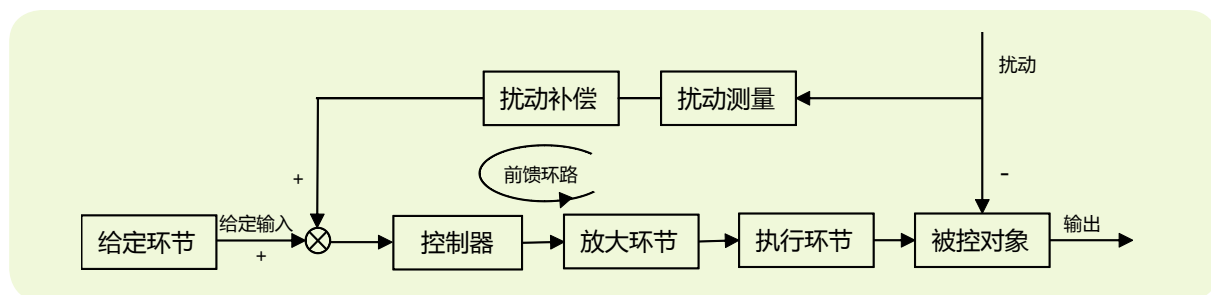


图15 前馈补偿及其双通道

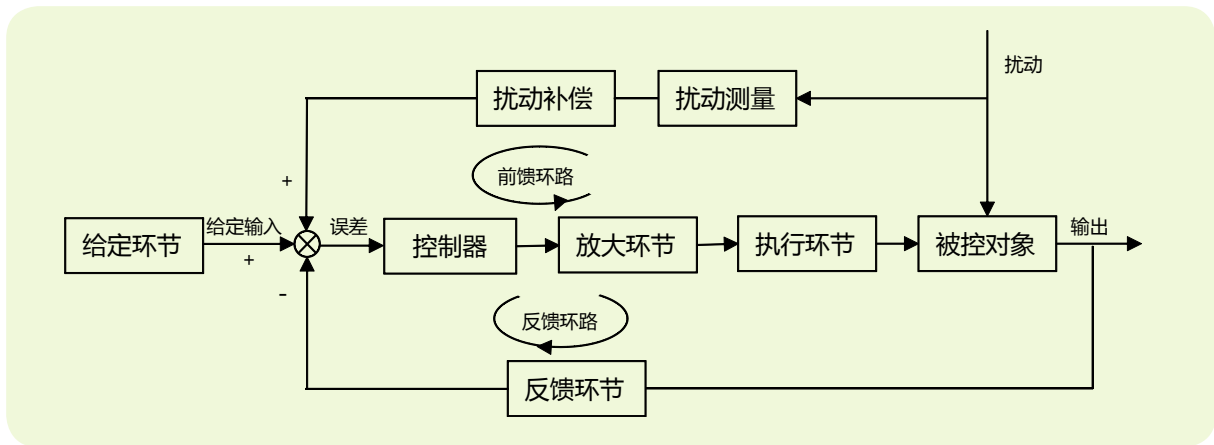


图16 复合自动控制系统框图

但是，如果扰动能被测量，再设计一个扰动补偿装置通过另一条称为“前馈通道”，或称“前馈环路”将修正后的扰动信号经过控制器（也可以不经过它）、放大环节、执行环节到被控对象的输出。这是第2个通道（图15上方）。这个信号或作用应该设计成是正的。这两个通道的信号都到达被控对象的输出，其响应正好正负相消。

为此，这个扰动补偿装置要设计得使这两条信号到达控制对象的输出时，其合成的响应为“零”，即输出在扰动出现时是不变的。这就是不变性原理。

不变性原理是，如何做到被控对象的输出（被控量）与扰动完全无关，或在一定准确度下无关的理论。能严格做到对象的输出在动态和稳态都绝对不变的，称为绝对不变性。以 ε 误差做到不变的，称为 ε 不变性。仅在系统稳态时满足不变性条件的称为稳态不变性。

这里，如上所述，扰动对被控对象的输出（被控量）的作用存在两条通道（图15），这称为双通道技术。这是实现不变性原理的必不可少的技术或条件。

今设法寻求能实现不变性的扰动补偿装置。

在图15上以 $F(s)$ 表示扰动作用 $f(t)$ 的拉氏变换式，扰动经过的被控对象内部的传递函数为 $G_{内}(s)$ ，则 $-F(s)G_{内}(s)$ 表示扰动 $F(s)$ 对被控对象的输出的拉氏变换式。

在另一通道，以 $R_{测}(s)$ 和 $R_{补}(s)$ 分别表示扰动测量和扰动补偿装置的传递函数，以 $G_{控制器}(s)$ 、 K 、 $G_{执行}(s)$ 和 $G_{对}(s)$ 分别表示控制器、放大环节、执行环节和被控对象的传递函数，则根据不变性原理 $-F(s)G_{内}(s) + F(s)R_{测}(s)R_{补}(s)G_{控制器}(s)KG_{执行}(s)G_{对}(s) = 0$

由此可求出补偿装置的传递函数 $R_{补}(s)$ ，然后再设法物理上实现或近似实现它。

实例可参阅拙著《控制论——概念、方法与应用》的3.5.5小节“扰动补偿及其设计”。从中可以看到，虽然往往不能做到绝对不变性（完全补偿），只能做到近似的不变性，效果就非常显著。

当然，除了已被补偿的扰动外，图15的系统还存在一些别的扰动，所以负反馈通道还是必需的。这样就形成反馈环路和前馈环路并存的控制结构，这称为“复合控制”（图16）。这种控制



图17 彩色显像管厂的大型玻璃炉

结构对抑制扰动的影响有很大的优点，而且很实用。

这里举一个作者亲自参与的实际应用的例子。陕西某彩色显像管厂，应用计算机作为PID控制器对大型显像管玻璃炉进行炉温自动控制。玻璃炉在结构上可分为四个部分：熔解池、工作池、两个蓄热室和两台投料机。大型玻璃炉有2层楼高（图17），仅熔解池就有75m²面积。因此，玻璃炉的时间常数（惯性）巨大。炉内温度高达1300℃，极易受到投料（玻璃原料）和西北地区

昼夜温差大而炉体散热变动的巨大影响。采用一般的PID控制器进行反馈控制，炉内温度波动大，影响产品质量。

为此，在控制系统中实现对上述两个主要扰动的补偿。向炉内的投料量是可测量的。投料量转换成电信号，再经过扰动补偿环节输入计算机，实现对投料量的扰动补偿；昼夜温差可以采用温度传感器来测量车间外的大气温度，再经过变送器、扰动补偿环节输入计算机，实现对昼夜温差的扰动补偿。结果玻璃炉的炉温控制效果很好。炉内的温度保持在1300±3℃之内。

其次，不变性原理可以推广应用到多变量系统解耦的场合。与单变量系统相比，多变量系统的控制要复杂得多。多变量系统的每个输出量通常都同时受到几个输入量的控制和影响，这种现象称为耦合或交叉影响。

工业锅炉是一个典型例子（图18）。这个被控对象有五个被控输出量：蒸汽压力 P_T ，蒸汽温度 θ ，汽包水位 H ，炉膛负压 P_V 和过量空气系数 α 。被控对象中也有五个可作为控制手段的输入量：给水流量 W ，喷水量 W_s ，燃料量 B ，送风量 AF 以及引风量 EG 。

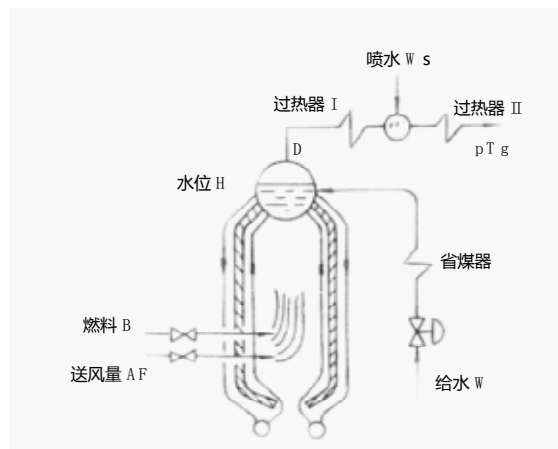


图18 工业锅炉生产过程示意图

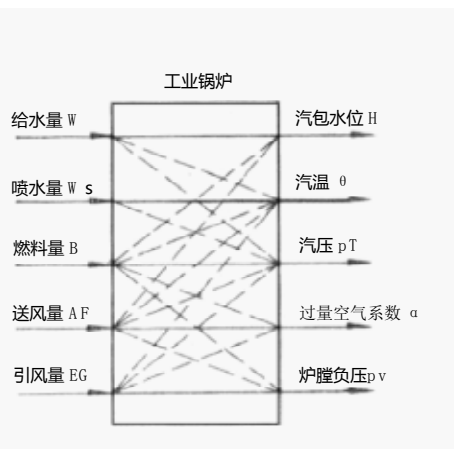


图19 5输入量-5输出量锅炉对象框图

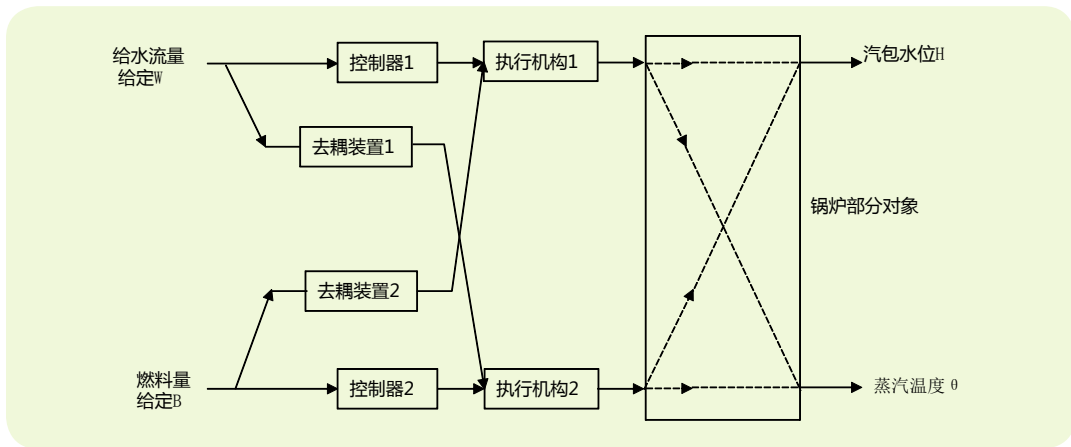


图20 锅炉的2输入量-2输出量部分对象的补偿解耦框图

这是个5输入量-5输出的多变量被控对象。

然而，锅炉内部关系复杂。例如，如因汽包水位 H 低于要求值，则应增加输入量给水流量 w 。然而与此同时，输出量蒸汽压力 P_T 、蒸汽温度 θ 都会变动，见图19中虚线所示。这就是耦合或交叉影响。

为了避免这种不良影响，工业锅炉的自动控制系统要设计成这样：以给水流量 w 为例， w 变动时有信息通过另外设计的去耦装置分别作用到蒸汽压力 P_T 和蒸汽温度 θ 等的执行机构，使蒸汽压力和蒸汽温度两者在给水流量变动时都不变或近似不变。其他4个输入量也仿此进行去耦装置的设计。

今为简明起见在图20上只画出2个输入量和2个输出量的简化的部分锅炉对象和相应的控制系统。其中每个输入量对2个输出量都有影响，如图20中的虚线所示。而汽包水位 H 和蒸汽温度 θ 各自的测量传感器，以及到各自控制器的主反馈回路，在图上未予画明。

交叉影响的存在使多变量系统稳定性问题也复杂起来。为此，对于多变量系统通常通过引入附加的去耦装置（环节），实现一个输入只控制

一个输出，称为解耦控制。图20上锅炉的部分对象通过去耦装置1和2实现对汽包水位和蒸汽温度的解耦控制。

在这种情况下，从给水流量给定 w 经两个通道影响到蒸汽温度 θ ：一条经过控制器1、执行机构1、再经过锅炉内部抵达蒸汽温度 θ 的耦合通道；另一条经过去耦装置1、执行机构2、再经过锅炉内部直达蒸汽温度 θ 的解耦通道。这正好是双通道，而且去耦装置设计的目的是要让控制器1仅控制汽包水位 H ，而不影响蒸汽温度 θ 。所以，正好可以利用不变性原理来设计去耦装置1来抵消控制器1操作的影响。实际上图18工业锅炉的耦合或交叉影响较多，每个都需要各自的去耦装置，才能实现整个锅炉的解耦控制。

去耦装置的设计计算也应用不变性原理，类似上文扰动补偿装置的设计计算。

利用不变性原理设计、计算扰动补偿装置和在多变量系统中设计去耦装置，有很大的实用价值。其抗扰动性能非常好，并在惯性导航、飞行器的轨道控制以及各类高精度的伺服系统等都应用得很成功。因而，这部分内容应该恰当地反映在高等学校的自动控制原理课程中。

要实现或应用不变性原理，扰动必须是可测量的。这限制了它的应用。中科院已故控制学家韩京清创立自抗扰控制的理论与方法，可以避免这个限制，代价是自抗扰装置比较复杂。但工业界研制的运动控制系统用的“自抗扰控制芯片”，已付诸应用。

7. 后记——缅怀中国科技史研究权威李约瑟和他的巨大贡献

1980-1981学年本文作者作为改革开放以来的首批高访学者公派访问伦敦城市大学系统科学系，以客座高级研究员身份参与到由教授P·罗伯茨（Roberts）领导的大工业过程递阶控制研究组的研究工作。在作者此前递送该系的简历中列出了发表的论著，包括1965的有关中国古代自动装置的原理分析的论文。

一天，系主任、教授P·K·麦克弗森（McPherson）问起作者这篇论文，作者当即将随带的论文复印送给他。他说他也曾经研究过指南车，并将他发表在英国机械工程师协会会刊上的有关论文送给我。他的结论和李约瑟一样，认为指南车是基于差动齿轮的自动控制系统。

数日后，麦克弗森告诉作者说，他与他的朋

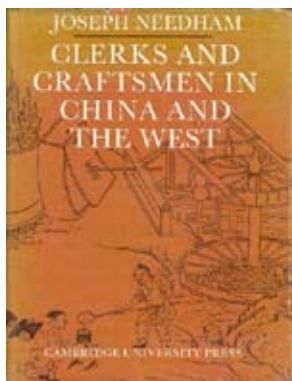


图21 李约瑟著：《中国与西方的学者和工匠：科学技术史的讲稿及演说》

友李约瑟（图2）联系了，将安排作者去剑桥大学李约瑟的研究机构访问一天。作者当然喜出望外。

作者对李约瑟的有关古代自动装置的著作，都曾研读过。而且在访问剑桥前，同系的资深教师F·埃特米德（Edmead）还购买了李约瑟所著《Clerks and Craftsmen in China and the West: Lectures and Addresses on the History of Science and Technology（中国与西方的学者和工匠：科学技术史的讲稿及演说）》一书送给作者（图21）。



图22 剑桥大学的李约瑟研究所

作者从这本书上发现一些重要的有关古代自动装置的新材料，补进作者后来为《中国大百科全书·自动控制与系统工程》卷编写的“中国古代自动装置”的条目里。

1981年3月一天下午，根据安排作者自伦敦乘火车到达剑桥，来到约会的剑桥大学的教师餐厅，见到李约瑟。晚餐时在座的还有两位教授汉语和研究中国文化的英籍教师。当晚安排作者睡在客房里，第二天早晨李驾车来接作者到他的研究机构。他80多岁还亲自开车，真令人钦佩。他先陪作者参观了他的四层楼的图书馆（图22），每层楼的书架上都摆满中国古书（线装书），



图23 横跨于剑河上的“牛顿桥”



图24 李约瑟巨著的中译本《中国科学技术史》

按数、理、化、天、地、生、农、医及工程技术等，分楼层分类存放，令人惊讶。此后又到了他的研究室，见到他的70多岁的华裔女助手、博士（后来又是他的续弦妻子）鲁桂珍。她从抽斗中取出作者的上述论文，三人进行有趣的讨论。

午餐后他安排一位年轻助手陪同作者参观了校园和各学院的古老建筑，讲解它们的历史故事，并带领作者踏上横跨于剑河（River Cam）之上的一座古老的木桥——有名的“牛顿桥”（图23），介绍了有关牛顿与桥的历史故事。

这是一次令作者终身不忘的安排和访问。试想作者比李约瑟小28岁，当时仅是一个刚升几年的副教授。而他是英国皇家学会的会员、英国国家科学院（British Academy）院士和剑桥大学Gonville and Caius学院前任院长。作者为了自动控制课程教学只是短暂涉足于古代自动装置的研究，而他是终身奉献于中国科学技术史的研究，著作等身，在全世界享有崇高的学术声誉。这次安排和访问只能以他对中国人民友好、热爱中国和热爱中国文化来解释。

新中国成立后，李约瑟发起并分别就任英中友好协会会长、英中了解协会会长。1994年94岁高龄的李约瑟当选为中国科学院首批外籍院士。

1995年他以95岁的高龄在剑桥寓所逝世。此前，他的原名为东亚科学史图书馆的单位已发展成为李约瑟研究所（Needham Research Institute）。他的巨著《中国科学技术史（Science and Civilisation in China）》的研究和出版计划，在他去世时尚未全部完成。由他的学生和后继者在继续研究，到2008年已出齐了7卷27册。这部巨著正在国内按册翻译由科学出版社出版（图24）。1987年他的这部巨著荣获中国国家自然科学奖一等奖。不少中国学者在他的影响下投身这个领域，继续这项极重要的研究。

作者谨在此缅怀李约瑟院士和他的历史贡献，以纪念他逝世20周年。

参考文献

- [1] From Wikipedia, the free encyclopedia. South-pointing chariot. en.wikipedia.org/wiki/... , 2013-01-18 (维基百科, 自由的百科全书. 指南车).
- [2] 颜志仁. 中国古代指南车的原理和构造. 上海机械学院学报, 1984, (3): 31-40.
- [3] Needham J. Science and Civilisation in China: Volume 4, Physics and Physical Technology. Part 2, Mechanical Engineering. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1965.
- [4] Booth, A D. Progress in Automation. Butterworths Scientific Publications, London. 1960.
- [5] 万百五. 我国古代自动装置的原理分析及其成就的探讨. 自动化学报, 1965, 3(2): 57-65.
- [6] 万百五. 中国古代自动装置(条目), 载于: 中国大百科全书“自动控制与系统工程”卷, 589-591页, 北京: 中国大百科全书出版社, 1991.
- [7] 刘仙洲. 中国机械工程发明史·第一编. 北京: 科学

- 出版社. 1962.
- [8] 万百五. 控制论——概念、方法与应用. 北京:清华大学出版社(第2版). 2014.
- [9] Needham J. Clerks and Craftsmen in China and the West: Lectures and Addresses on the History of Science and Technology, UK: Cambridge University Press, 1970.
- [10] 高志强. 抗扰控制思想探究. 控制理论与应用. 2013, (30)12: 1498–1510.
- [11] Preminger J. Some considerations relating to control systems employing the invariance principle. IEEE Transactions on Automatic Control, 1964, 9(3): 209–213.
- [12] 搜狗百科. 不变性原理. – baike.sogou.com – 2014–12–17.
- [13] Needham J. Science and Civilisation in China. UK: Cambridge University Press. 7 volumes, 27 parts. 1954–2008.
- [14] 陆敬严. 八十年来指南车的研究. 自然辩证法通讯. 1984, 6(1):53–58.
- [15] 韩崇昭, 王月娟, 万百五. 随机系统理论. 西安:西安交通大学出版社, 1987.
- [16] Zhang H, Han C, Wan B, Shi R. Identification and control of a large kinescope glass furnace, Automatica, 1994, 30 (3): 887–892.