

由工艺控制理论的发展看传统工业的现代化技术路线

Technical Routine of Traditional Industry Modernization in View of Development of Technological Control Theory

张进之

(钢铁研究总院, 教授级高工 北京 100081)

一、引言

信息时代已经到来, 以信息传递为目标的信息产业发展迅猛。信息领域在发达国家早已是重点发展的领域, 如信息高速公路的概念就是美国率先提出的。在这些国家, 由于衣、食、住、行问题已解决, 因此像冶金、机械等传统工业已不占据国家的主导地位, 而是转向依靠高新技术产业更大、更快地创造财富。尽管我们在信息技术方面要下大气力赶上世界技术潮流, 但是作为发展中国家, 中国必须要有相应的发展策略。我们现时的发展策略仍然是要立足于传统产业的现代化改造。因为传统工业与信息产业的关系, 就如同基础和上层建筑, 传统工业落后, 信息产业发展再快, 也如同没有实物作基础的物质交换, 必然会形成无根基的泡沫经济。

传统产业的改造要依靠高新技术: 计算机、控制论、信息论等, 但是又必须与工艺理论相结合。就以笔者已工作了数十年的轧制领域来说, 尽管近 20 年大量引进了国外众多先进装备和技术, 但真正实现现代化的比例仍然很低, 究其原因恰是这些技术未能实现国产化。但也有成功的例外, 如, 结合国外引进自主开发成功的以计算机为手段, 将轧制工艺理论与控制论结合, 形成有自主知识产权的一种轧制工艺控制理论和相应的动态设定型变刚度厚控方法 (简称 DAGC)、综合储备负荷分配方法, 现已在多套国产大型板带轧制上推广应用, 其产品质量达到国际水平, 特别是 DAGC 于 1996 年在宝钢 2050 热连轧试验成功, 已完全代替原引进的厚控模型, 且正常工作了近 4 年, 使厚控精度上了一个台阶。这一自主开发的技术优于国外引进技术的根本原因是: 国外是靠装备创新和复杂控制系统提高产品质量的, 属外因论方法; 我们是找到轧制工艺控制过程内部规律, 利用其规律控制生产过程而提高产品质量的, 属内因论方法。由此可以看出, 从工艺控制对象的工作机理和本质入手, 仍然是最根本的发展策略, 在此基础上的理论与技术的结合, 将会进一步形成一套完整的工艺控制理论。

本文以轧制过程控制进步为实例, 论述传统工业现代化的具体技术方法。

二、轧制技术的先进性及发展中的矛盾

轧制生产是极重要的制造业, 它为国民经济提供大量的材料。为提高产品质量, 必须降低能耗和物质消耗, 所以对其生产过程优化控制十分重要。而轧制过程是典型的力学系统过程, 在轧制压力作用下, 轧制发生塑性变形, 轧机发生弹性变形。要控制就应当认识和利用其中的规律。50 年代以前轧制理论研究集中于轧件塑性变形规律及力能参数计算, 并由此建立了以体积不变和最小阻力定律的塑性加工理论, 得出轧制压力、力矩、前滑、宽展等计算公式。后来英国钢铁协会 (BISRA) 引入轧机刚度概念得出弹跳方程, 这是轧制理论与技术的一次飞跃, 反映了控制论的理论和观念。控制论介入应用科学是以 1948 年维纳提出控制论为起点的, 它的基本精髓是“反馈”。BISRA 轧制理论的提出与控制论的建立, 在时间上是一致的。弹跳方程的实质是轧件厚度测量和控制方程。实现了轧机的测厚仪功能后, 线性化弹跳方程即可推出厚度自动控制系统 (AGC)。

计算机的发明和应用是 20 世纪最重大的技术创新, 它在工业上的应用实例, 可首推连轧过程的计算机模拟试验, 分别于 1955 年、1957 年实现了静、动态模拟, 也弄清了连轧过程参变量之间的定量关系。计算机模拟、仿真、虚拟技术等的应用, 也是始于轧制。计算机应用于工业过程控制, 首先是从热连轧设定控制开始的。由它代替人工设定并实现了连轧机辊缝和速度的自动设定。1962 年在第一台热连轧机上成功后, 到 70 年代美国所有热连轧机几乎全部实现了计算机设定控制。目前世界上大部分大型连轧机基本上都用计算机控制。

但现代控制论在轧制生产上的应用未能达到预期效果, 其实质原因是未能建立相应的工艺量的状态方程。如上文所述, 笔者通过多年的努力, 终于为轧制最优控制建立了张力、厚度、板形的工艺量状态方程, 并在生产实践中得到完全的验证。笔者认为, 这一研制过程中的观点、方法可供传统工业现代化借鉴。此方法可统称之为工艺控制论。

三、轧制工艺控制论的进步

这里,以轧制过程工艺最复杂的连轧为对象进行讨论。连轧过程的张力是最重要的参数,所以对张力问题的研究早在 40 年代就开始了。1942 年苏联学者开始对工业应用的张力微分方程提出异议,1947 年 Финберг 院士提出张力变形微分方程,Чермаев 院士又提出另一个张力微分方程。工程界就两个微分方程在 50 年代争论激烈,虽没有最后结论,但大部分学者同意 Чермаев 的张力微分方程。然而两位院士在解微分方程时均未将张力自动反馈引入,所以也都未获得连轧张力动态数学模型,从而导致国外连轧理论一直停留在秒流量相等的静态水平上。后来由于有计算机仿真技术,连轧动态过程的数字关系搞清楚了,控制系统设计和相应的参数确定也可进行了。

笔者是在研究了连轧张力后,开始建立连轧过程数学模型的,随之又研究了厚控过程分析和板形测控等问题,下面仅就这 3 个问题作一简介。

1. 连轧张力理论

笔者是由守恒原理推得精确张力微分方程,从而解决了两院士的争论的。引用张力与厚度、轧辊速度和前滑之间线性关系,机架内体积不变条件下可得出多机架动态张力公式。张力公式是和弹跳方程相似的测控数学模型,方程中的轧辊速度是控制变量、厚度和张力的。冷连轧的张力则可通过张力计来测量,所以由张力方程也可以计算厚度。此外笔者还证明了连轧张力系统是可测的、可控的、渐近稳定的动力学系统^[2]。这说明,只要认识了连轧的自动控制功能,即可实现张力最优控制。

连轧张力公式反映了连轧过程中的结构定律,由它可推导出秒流量相等的条件,并得出张力与秒流量差成正比的宏观定律。张力理论中的流量计算是以无张力影响的前滑为依据的,所以各机架间的流量差就构成产生张力的“力”,张力则属于“流”。与电学相比较,秒流量差相当于电压,张力相当于电流。

连轧张力理论实际应用于:冷连轧张力、辊缝闭环的恒张力与厚度的互连控制系统(简称连轧 AGC);通过张力公式与压力公式的联立,估算变形抗力和摩擦系数;(正与宝钢合作)在 2050 热连轧机上试验无活套连轧技术。德、日在 70 年代开始试验热连轧无活套轧制技术,取得一定成果,但一直未推广应用。笔者通过实践与理论的研究已分析出国外未成功的主要原因是由于在控制器设计上误用了秒流量相等条件。秒流量相等条件是静态规律,不能用于控制器设计上。

2. 压力 AGC 过程分析

英国人 1950 年发明压力 AGC 方法时,只引进了轧机刚度系数,之后,美、德、日分别以不同方式引进了轧件塑性系数,使 AGC 厚控方程更加完善,在生产中得到普遍推广应用。AGC 中的分析是采用“p-h”图几何方法,但笔者认为几何方法不能准确

反映厚度调节过程中的动态、多变量、非线性的实际情况,故改用了数学分析方法。此法使我们对厚度调节过程的认识深入了一步,首先发现轧件扰动可测,从而推导出动态设定型变刚度厚控方法(简称 DAGC)。DAGC 特点是响应速度快,消除扰动的辊缝调节可以一步到位,将厚度自动控制从随机问题转化为确定性问题。

由于该方法实用效果明显,在理论上优于日、德发明的动态设定厚控方法,故笔者于 1996 年获国家发明奖。笔者这一理论的先进性表现在:可推得轧件、轧机和控制系统的三参数的级数方程^[3];进而可得出可变刚度系数的计算公式,而国外无此方程,可变刚度系数只能由经验确定。

3. 解析板形刚度理论

国际上板形理论的研究远早于厚控理论的研究,却一直未取得重大突破,即未达到厚控理论的水平。长期来国外提高板形质量主要是依靠板形控制装备的创新和复杂的控制技术来达到的。日本发明了 HC、PC 板形控制轧机,德国发明的 CVC 可动态改变轧辊凸度,欧洲则开发了 DSR 轧辊。多种装置的产生是受知识产权的限制而造成的,各种方式各有千秋,但都未能彻底解决板形控制问题。上述种种设备只是解决板形控制的外部条件,在板材成形内部规律未准确认识的情况下,是难以得到最佳控制效果的,所以解决板形问题还必须建立反映客观规律的板形理论。

板形理论的进步分三个阶段。经典的板形理论是以计算轧辊挠度为主的弹性简支梁理论。现代板形理论包含两部分,其一是计算轧辊变形的弹性基础梁理论和影响系数法;其二是计算轧件变形的遗传理论,其中有日本人的实验方法和美国人的有限元方法。最近笔者提出的轧辊和轧件统一的板形理论,称之为新板形理论。新板形理论的发展分三步:第一步是以日本、美国的遗传理论为依据,提出与厚控理论相似的板形测控数学模型;第二步是笔者提出的解析板形刚度理论^[4],实现了轧机板形刚度和轧件板形刚度的理论计算,并通过板形刚度方程得到试验验证;第三是笔者通过板形测控数学模型线性化发现了板形板厚协调规律。其协调规律是以厚度为控制量,以板凸度和平直度为状态量的二阶差分方程,由它可实现板形板厚的最优控制。

以上张力、厚度、板形三个基础自动化层的状态方程的建立,可以将现代控制论应用于连轧过程控制上,其特征是通过解析法建立数学模型。

四、板带轧制过程的智能控制

连轧过程设备多,需协调的目标量多,而且板形、板厚目标是相矛盾的。对于这种复杂的追求多目标的系统只有采用智能控制方法,笔者已用于中厚板轧过程控制分层递阶的智能控制方法,获得了第二届全球智能控制最佳应用论文奖^[5]。现已将智能控制方法进一步推广到冷、热连轧机上^[6]。以往的板形控制只是指平直度的控制,采用的是经验方

法,属模糊控制。现已建立的解析板形刚度理论和板形板厚协调规律,增加了连轧过程智能控制的知识比重。

现以热连轧为例。热连轧中智能控制系统由组织级、协调级和基础级三层构成。组织级为决策级,给出板形最佳轧制规程和自学习、自适应功能。组织级所用公式为静态数学模型,为已普遍应用的传统公式,由笔者新增加的则是由板形状态方程和二次型目标函数获得的命中厚度、平直度、板凸度目标的目标轨线。组织级智能度要求最高,但模型精度要求低(IPDI)。

协调级的功能,是校正设定时的误差,组织级对计算优化轧制规程用的温度、厚度、宽度在轧制前就预先给定了的,所以当粗轧完成后,进入精轧机前,已得到温度等实际值,此时需在协调级通过协调推理网络(并行计算)使辊缝和速度设定值精确化。

基础级,又称基础自动化级。其功能是,穿带时,当第一机架咬钢后,通过压力辊缝实测信号计算出厚度、平直度、板凸度,以及此三个量与目标轨线值之差,再由贝尔曼动态规划修正后续机架的辊缝速度设定值;第二机架及以后各机架咬入后,继续由贝尔曼动态规划修正辊缝和速度设定值,以达到命中目标厚度、平直度、板凸度值。正常轧制时,基础级的功能是定时预报轧辊实时凸度提高板形的估计精度。由入口厚度、轧辊凸度、速度的变化会引起目标值的变化,为使目标值恒定,故而需由贝尔曼动态规划求出动态压下量的修正值,该值可由修正DAGC的辊缝和压力锁定值而实现。

张力是一个独立的子系统,可通过二次型目标函数和张力状态方程来实现张力最优控制。张力子系统与板形板厚子系统是相互独立而互补的,张力子系统保证了张力恒定而使板形板厚协调控制计算的简化精度提高;板形板厚子系统向张力子系统提供厚度信息而实现张力预控进而构成张力复合控制,进一步提高了张力控制精度。厚控系统向张力系统提供的厚差信号,正是张力系统的扰动,可起到扰动观测器作用而实现张力预控。笔者创建的新型热连轧智能控制系统是建立了解析张力、厚度、板形数学模型后的必然结果,当然计算机、控制论和信息论是必要的基础知识条件。

五、连轧控制系统的计算机仿真试验

国外已有的求连轧过程最优控制的状态方程,皆是由机、电系统给出的,没有工艺系统的状态方程。状态方程维数虽很高,却无工艺目标量,故实际生产中很难实现最优化,一直未能在生产中应用。笔者建立的连轧张力状态方程,状态量张力是工艺目标,控制量是速度,都是可测的和可控的,但单纯由张力状态方程求出的轧辊速度还必须通过传动系统的传递函数才能实现,所以要实现完全的张力最优控制还要继续探索。具体作法有两种:一种是由工艺、机、电一起写出状态方程求其最优解;其二

是通过计算机仿真实验方法验证,不考虑机电系统动特性对其性能的影响。已做的仿真试验证明,后一种简化的最优张力控制系统是可行的。此外DAGC情况下与张力最优控制实现过程是相同的。后者也是通过仿真试验,证明压下系统动特性的影响程度可忽略,进而在工业轧机上推广应用的。总之,实践证明这种工艺控制论方法是成功的。

张力、DAGC问题的仿真试验所提供的经验是:可将设备控制系统独立化,进而可使传统的控制系统分析与设计大大简化。机、电系统的状态方程是成熟的,这种情况下,压下系统、传动系统的最优控制也就可以实现了。当然,目前计算机能力很强,可将工艺、机、电一起列写出状态方程,直接实现工艺与电信号之间最优控制,但这样做实际上并不一定有利。这可能反映出实现工艺状态量的最优控制工程中,计算机仿真试验的重要性。

六、解析数学模型的参数优化

解析的状态方程是实现最优控制的条件,但从机理演绎出来的状态方程一般皆有一些假设和简化,所以推出的数学模型与实际有误差。例如解析板型刚度方程是由集总参数代替分布参数的,所以如何使解析数学模型参数优化是一个重要问题。已在工业上成功应用的提高压力预报精度的变形抗力和摩擦系数估计方法,是通过正常工况采样数据实现的,它是一个反演问题。反演在自然科学研究中十分重要,它与实验方法是同等重要的。伽利略的物理学是以试验为基础,而天体力学只能依靠观测数据反演得出理论公式的参数,这也就是高斯发明最小二乘法的原因。

工业生产创新一直重视试验,这当然是十分重要的,但当今已发展到信息时代,所以传统工业现代化过程中应充分利用信息、控制论和计算机科学,通过生产过程中可获得的大量信息,利用反演法来提高数学模型的精度是一条可行之路。连轧数学模型取得重大进展,就是充分利用了分析(演绎)和反演统一的方法。

七、传统工业现代化问题的讨论

总结上述轧制理论与技术的进步,可归纳为四点:第一、建立工艺控制数学模型;第二、实施智能控制;第三、计算机仿真试验;第四、反演法优化模型参数。下面就其中最主要的工艺控制数学模型和智能控制问题作一些讨论。

1. 工艺控制理论

物理学是最基础的科学,从伽利略开创试验物理学以来,一直将试验、抽象、理想试验和数学推理作为最基本的研究方法。牛顿发展了伽利略的思想和方法,发明了微积分等数学工具,总结出力学三定律和万有引力定律,用数学演绎方法建立了经典力学体系和机械观。物理学另一次飞跃为麦克斯韦电磁理论的建立,它比牛顿力学更深刻地反映了物

质世界的客观规律。牛顿研究的是变化的过程,对运动如何起始不作分析;麦克斯韦的场论方程,则反映了运动的起因和状态的变化。牛顿定律属于宏观定律,而麦克斯方程则是微观结构的定律。20世纪物理学三大发明是:相对论、量子力学、混沌学。与传统工业化相关的物理理论是牛顿定律、麦克斯韦方程,当然爱因斯坦的哲学观点也是十分重要的。特别是爱氏所强调的因果律和寻求隐参数的观点,尤给人以启发。

生产工艺问题目前基本上还停留在经验阶段,其原因是工艺过程太复杂,是多种运动的综合体,属于复杂的动态、多变量和非线性系统。在计算机发明推广前,研究工艺过程的客观规律是难以做到的,现在应当说已有可能,笔者对连轧过程的研究就是实例。

国外在连轧控制上应用现代控制理论因遇到缺乏工艺状态方程而受阻,所以一直只能采用常规控制方法。随着计算机应用的发展,在连轧机控制上应用人工智能方法,在负荷分配、压力预报、板形控制等问题上取得一定效果,但始终未获根本性解决。根本原因,在于国外未建立起相关的工艺理论。笔者正是基于工艺解析理论的建立,所以才在实际生产中实现了最优控制。

从轧制工艺控制理论发展过程来看,最重要的是解析数学模型的建立。为什么在这个领域实现了国外没有的我国有了呢?1967年开始研究热连轧数学模型时,我国的条件非常落后,一无计算机控制的连轧机,二无试验设备和测量仪器,所以只能用数学分析的方法研究连轧数学模型。当时我们的有利条件是协作精神,参加研究的有数学家、控制论专家、设备工艺专家等,不同专业的专家学者在一起互相学习,提高快。笔者是学工艺的,在数学模型和控制论方面较快地掌握了主要内容并应用到研究工作中。体会到只有掌握多种专业知识,才能在技术和理论上把问题提出来,再将数学问题请教数学家、控制问题请教控制论专家,问题就会很快解决;老问题解决了,也会带出新问题,循此路不断探索,笔者才建立了我国独有的轧制动态数学模型体系。笔者以为,其他工业过程的工艺控制数学模型也可以这样建立。

2. 智能控制

可以说,工艺过程自动控制是改造一切传统工业的主要技术内容。自动控制可以提高产品质量、降低能耗和原材料消耗,使生产实现多、快、好、省。其控制方法本质上是分层递阶智能控制。

控制发展经过了单输入单输出的经典控制,到多输入多输出的现代控制论。现代控制论要求反映系统内在规律的状态方程。而建立状态方程方面的困难导致了人工智能(专家系统、模糊控制、神经网络)的发展,人工智能与控制论结合又产生了智能控制。智能控制最初是由常规控制与人工智能组成,后来又增加了运筹学、“三元论”,后又有人提出增加信息论的“四元说”。笔者正是从轧制智能控制的实践中,对智能控制理论提出了以下一些新想法,当然可能还不全面、有错误,仅提出来供讨论。

智能控制的四个基本概念:智能、信息、知识、反馈。

智能控制的组成:控制论+信息论+计算机科学。计算机科学含人工智能和运筹学,所以这里新提出的“三元论”实际上是原先“四元论”的另一种说法。

进一步分析,控制论的维纳定义中包含了信息传输内容。信息网络也包含了控制方面的内容,所以笔者在这里提出将控制论与信息论合并称信息控制论,这样就可以定义智能控制为二元论内容:信息控制论+计算机科学。

控制离不开信息,实时信息是最主要的,它与知识有关。对于一个考古学家,从一件古物中得到的信息虽然很少,却可以从中知道它的年代、产地、特征等。如轧制问题,由于轧制专家具有弹跳方程知识,从辊缝和压力信号中,就可知厚度信息,从而实现厚度自动控制。板形问题长期解决得不好,就是因其知识未达到牛顿力学水平。当新板形理论达到牛顿力学水平后,从压力和辊缝信号中就可以获得各机架的板凸度和平直度,从而可实现板形闭环最优控制。

由轧机可测信号得出轧件板形定量信息,从出口机架有板形仪测得轧件板形信号,再转化为轧辊实时凸度,就可实现板形自适应控制。这种由轧机知轧件和由轧件知轧机的信息的互相转化关系就是牛顿第三定律的应用。由于工艺控制论的板形测控数学模型的建立,利用已有的测量信号进而转变为信息,就可以完全解决板形测控问题了,笔者的这一理论和实践探索的成功实例,表明了解析理论的重要性。

知识与信号构成信息,但在知识较少时,要有许多信号才能得到可供控制用的信息,所以必须增加知识,进而认识和掌握因果规律。人工智能可在无因果规律情况下,直接利用信号实施控制。掌握状态方程,则可实现最优控制,所以人们应千方百计建立系统的状态方程。

以上分析强调的是机理数学模型建立的重要性。由于有了计算机、控制论、信息论,因此生产过程的规律是可以被认识的。工艺学早已有了,现在应当建立的是工艺控制学。应当在工艺控制论研究上有所突破。

参考文献

- [1] 张进之. 板带轧制工艺控制理论概要, 中国工程科学, 2001, 3(4): 46~55
- [2] 张进之. 连轧张力公式. 金属学报. 1978, 14(2): 127~137
- [3] 张进之. 压力 AGC 参数方程及变刚度轧机分析. 冶金自动化, 1984(1): 24~31
- [4] 张进之. 解析板形刚度理论. 中国科学(E辑), 2000, 30(2)
- [5] 张进之. 中厚板轧制过程分层递阶智能控制. 钢铁 1998, 33(11): 34~48
- [6] 张进之. 基于协调推理网络的热连轧设定控制结构. 控制与决策 1996, 11(增1): 204~208

(责任编辑 蔡德诚)