

数字式、无离合装置 连铸机结晶器液面自动控制系统

国际先进水平成功实施之揭秘

结晶器液面塞棒控制系统能获得 $\pm 2\text{mm}$ 的高精度吗？

- 0 维护：大于 95% 实现
- 0 培训：大于 95% 实现
- 0 调整：大于 95% (方坯) 90% (板坯) 实现
- 0 要求：大于 95% 实现

答案是肯定的，北京亿美博科技有限公司 1998 年在重钢板坯连铸机结晶器液面控制系统中推出的“数字电缸塞棒控制系统”，将液面控制精度稳稳地定在了 $\pm 1-2\text{mm}$ 的国际先进水平上，否定了过去认为塞棒控制死区需要 $\pm 5\text{mm}$ ，控制精度只能维持在 $\pm 5-8\text{mm}$ 水平的说法，超过了目前滑板控制系统 $\pm 3-5\text{mm}$ 的控制精度。近来，在太钢连铸等项目投入的液面控制系统也相继达到了 $\pm 1-2\text{mm}$ 的控制精度，迄今为止，亿美博公司提供的数字电缸塞棒控制系统无一例外地获得成功，并达到高精度。如此精确而稳定的技术指标是如何实现的？其中诀窍何在？本文将从控制理论和执行机构两方面澄清这些问题。

1. 控制理论的突破：

1.1 采用智能、模糊及变结构 PID 控制代替传统的数学模型控制方法：

传统的控制方法要对被控制系统建立精确的数学模型，而建立数学模型对于连铸液面控制中诸多不定因素和突发事件，几乎是无法准确建立的。塞棒与水口之间的流道，本身就是非线性曲线，而不同钢种，不同的钢温，不同的中间包深度，不同的拉速，不同的塞棒和水口的材料等，加上随时可能发生的塞棒和水口无规律的变化（腐蚀或堵塞），这么多未知的变化因素，怎么能够由一个根据可知因素描写的人为数学模型所精确描述呢？无法精确建立有效的数学模型，导致自然传统的控制方法无法达到较高的控制精度。

根据 AEME International Corporation 长期统计的经验，一个熟练的主浇工，可以在获得液面位置检测参考的情况下，3-5 分钟内将液面稳定控制在 $\pm 3-5\text{mm}$ 范围内，但是长时间操作将因为过度紧张而降低控制精度，甚至使发生事故的几率大大提高。

根据 AEME 的经验,我们不难看出,一个有经验的工人可以将系统有效地控制在精度要求范围之内。但是人并没有在大脑中建立任何数学模型,也并未进行任何的计算,那么人是如何进行控制的呢?

首先大家知道,在人工控制过程中,“经验”是我们需要的重要因素。“经验”大致如下:

- 1.1.1 根据液面的误差量,调节塞棒压杆的不同行程(一般经验);
- 1.1.2 突然出现大的液面波动,放弃常规的经验,选用特殊的调节压杆量(特殊经验);
- 1.1.3 当大的液面波动在采用了特殊的调节方式后仍无好转时,进行紧急故障分析,判断是否出现生产事故(事故经验)等等。

从以上“经验”中我们发现,人的控制方法仅仅是在已经拥有的经验中寻找近似的控制策略和控制量,并未进行任何模型计算,便已经有效地控制了系统。用近似自动控制专业语言说,人在从已经拥有的 1-3 条经验中选取控制策略的“选取”过程就是“人工智能”选择;而在某一控制方式下选择出来的控制量,就是对应模糊控制中模糊集里的模糊数据。

根据以上分析,AEME International Corporation 和亿美博科技有限公司提出了采用智能、模糊及变结构 PID 的新连铸机结晶器液面自动控制策略。该控制软件在重钢七厂的第一次调试运行中即大获成功。

在该控制软件的运行过程中,“人工智能”不仅进行系统的策略判断和选择,更重要的还有帮助系统进行传感器信号的分析,以判断和选取真实和有效的内容,以及对故障进行预报和相应处理等。而我们前面未能提到的变结构 PID,则主要是进行系统的精确调整,它与人工智能和模糊控制在不同状态下有机结合、协同工作,使系统既有快速的调节能力(大于 60%的系统波动,3 秒钟回到设定值的 97%),又不出现被控现象超调震荡,在设定值附近($\pm 1\text{mm}$)长期保持(大于 70%时间)稳定的工作状态。

另外,我们注意到在人工控制过程中,经验的积累需要一个长期的学习过程。因而,我们不仅将智能、模糊及变结构 PID 应用到控制系统中,而且开发出自学习系统,应用于整个控制过程。它使得整个控制系统仅仅需要第一次的参数设定(启动系统),此后系统将根

据长期使用的统计、分析,对控制策略和控制参数(模糊集中的模糊数据、PID 参数等)进行自行优化和更新。为保持和扩大技术优势,我们不久还将推出不需要参数设定的自动控制系统。

新的控制理论完全抛弃了传统的、建立数学模型的复杂而不实际的控制方法,采用模仿熟练工人的操作方式——人工智能+模糊控制+变结构 PID 调节+自学习,使控制系统体现出如下优点:

- 控制精度高: $\pm 1\text{mm}$ (大于 70%时间)(重钢生产统计);
- 运算速度快;
- 系统配置低;
- 投资更节省;
- 减少维护量等。

1.2 采用数字控制代替模拟控制:

传统的控制系统采用模拟量进行运算和控制。这种控制方法使得系统抗干扰、抗污染能力差,调试环节繁多,受温飘、零飘的影响较大,因而在长期使用过程中需要不断进行参数调整;而模拟系统的各个参数之间的相互牵连又十分繁琐和复杂,因而最佳参数不易寻找,对控制系统不十分精通的现场维护人员甚至可能将系统“调乱”,直接影响正常生产。实际上调整困难正是众多的模拟伺服系统不能长期使用的一个重要原因,人们常说的“教授在时都好用,教授走后无法用”就是最好的证明。

新系统采用全数字控制,克服了模拟控制的诸多缺点,更加突出了它的独特优点——在零点附近的调节具有和大误差调节相同的快速性,而且几乎不需要调试环节,系统从第一次正常投入运行后,决不需要进行参数的变更,体现出极好的稳定性。至于我们在前面提到的不需要参数设定的自动控制系统,因为没有设定的参数,自然就没有可以调节的参数了。

1.3 采用单闭环代替传统的双闭环控制:

传统的控制方法是执行机构位置闭环+液面位置闭环的双闭环控制系统。尤其是执行机构位置闭环控制,需要经过伺服系统的一整套处理,大大降低了系统的反应速度和控制精度。新系统采用了数字电液缸,接受数字控制信号后,可以开环完成高精度的定位(控制系统根据液面误差送出的塞棒机构新位置),因而使得整个系统实现直接液面单闭环控制,系统响应速度和控制精度大大提高。

2 执行机构上的突破：

2.1 采用电动执行机构代替液压执行机构：

液压系统要对钢水液面进行有效控制，通常选用液压伺服系统。液压伺服系统需要设置专门的高清洁液压站、蓄能器、伺服阀、伺服缸等，这一套装置有的装在中间罐车上，有的装在地面，用软管送到中间罐车上。

2.1.1 液压伺服系统调试方面的麻烦：

前面已经提到，伺服系统会因为各种因素的变化而需要不断地调整，而液压伺服系统在调试方面存在的问题更加繁杂。系统出了问题，从液压系统外部根本无法看出毛病所在，又没有仪器可以直接看到系统内部情况，因而只能靠拥有丰富经验的液压专家进行分析和不断试验，方可找到解决问题的方法。而真正能称为伺服液压专家的人又有多少呢？因此，我们经常遇到系统经过长时间调试后才勉强可以使用的情况，甚至系统根本调试不出来的事例也屡见不鲜的。

2.1.2 液压伺服系统维护和使用十分麻烦：

我们都知道，液压伺服系统要求介质的十分清洁，而对于工业环境，尤其是炼钢环境，这一点几乎是无法达到要求的。一旦出现液压伺服阀堵塞失灵，经济损失将十分严重。即便是达到清洁要求，液压系统惯有的“跑、冒、滴、漏”在钢水连铸过程中也将是极大的安全隐患。当出现溢钢或是漏钢时，罐车须快速逃离工作位置，液压连接软管不仅可能影响罐车的紧急运行，而且可能因为受高温钢水烘烤而出现断裂，从而造成设备损坏，甚至造成人员伤害。

2.1.3 采用液压伺服系统相对采用电动控制系统的投资将大大增加：

我们在众多的报价中很容易发现，电动系统价格普遍低于液压伺服系统。因为电动控制系统的一个电液缸便有效代替了液压伺服系统中的所有器件（高清洁液压站、蓄能器、伺服阀、伺服缸等）。

2.2 采用数字执行机构代替伺服执行机构：

伺服执行机构相对于数字执行机构，在控制方式和过程上存在着欠缺。由于采用模拟量进行运算和控制，使系统工作状况不稳定，调节十分困难，这一点前面已有详细描述。导致这种情况的主要原因在于传统的“双闭环”控制方式：当传感器检测到液面误差时，将误差信号经过一整套前述不实用的模型计算后，送出一个新的伺服油缸或电缸位置信号，这个信号与油缸或电缸上带的位置传感器信号相比较，其差值经过模型计算后，送至伺服放

大器放大,变成伺服阀阀芯或伺服电动机的运动,再经液压或机械放大后驱动油缸或电缸运动。这是一个双闭环系统,其外环为钢水液位,内环为油缸或电缸位置。这种双环控制,其内环为了保证稳定、避免振荡,增益往往不能过大,因而其结果是微动油缸或电缸时,响应较慢,于是造成双环系统的外环控制精度大大降低。

在这种“双闭环”控制系统中,其内部位置闭环对于系统控制精度和整个控制过程,都是生死攸关的。而位置闭环所依赖的位置传感器,存在信号稳定性和寿命问题;位置闭环的处理过程,制约了整个系统的响应速度和控制精度。

数字执行机构,与数字控制在理论上的突破相适应,在建立电动缸微动与数字信号一一对应关系的基础上,彻底取消了伺服系统的位置闭环。不仅从根本上解决了伺服执行机构的痼疾,同时使系统在 0 点附近调节具有与大误差调节相同的快速性,基本不需要维护调试,保证了整个系统长期稳定地运行。

由于新技术在理论和机构上都取得了重大突破,使连铸机结晶器液面控制技术获得了飞跃的发展。它直接体现出如下优点:

- **控制精度高**: 由于有极好的微动性和快速反应能力,因而大大提高了控制精度,达到 $\pm 1-2$ mm 的国际先进水平,甚至超过了价格昂贵的滑板控制系统 ($\pm 3-5$ mm)。
- **系统简单**: 传感器将信号送至中央控制器经运算处理后直接控制数字缸,不需任何其它转换环节。
- **价格便宜**: 由于省掉了液压系统,投资大大降低。
- **维护简单**: 本系统平常几乎无维护环节,可大大降低维护工作量。
- **安全可靠**: 没有液压系统,解决了液压系统跑、冒、滴、漏的难题,提高了安全性和可靠性。
- **操作简单**: 操作工人无须单独培训,只要熟悉手操盒几个按钮即可完成控制。
- **安装方便**: 只需一个人即可将数字电缸装于中间罐车上,装卸时间不超过 1 分钟,也不需吊车。传感器装卸时间仅几秒,特别适宜事故快速处理。
- **设备轻巧**: 数字电缸约 20 公斤,整个系统也不到 150 公斤。
- **反应迅速**: 数字电液缸响应时间少于 10 毫秒,大大优于液压伺服系统和电控系统。
- **微动性好**: 数字电缸微动精度可达 0.0125mm,大大优于其它系统。
- **推力可调**: 其推力可调节,既保证有足够的推力,适应恶劣工作环境,不用购买国外塞棒机构,又保证适当推力,不会损伤塞棒及水口。
- **无扰投入**: 自动控制和人工压杆控制的相互转换只需在手操盒上进行,开关瞬时转换。

投入自动时采用无干扰切换, 确保投入平稳可靠。

- **故障少**: 本系统不象伺服系统有温飘、零飘、易振荡、易堵塞(液压系统)等各种毛病, 运行中故障率低, 并且长期稳定, 无需调整。
- **节省能源**: 系统耗能 400 瓦, 比液压伺服系统节能 90 % 以上。
- **备件容易**: 因全部在国内成套, 可保证备件长期供应。
- **调试容易**: 只需在控制柜面板上的文本显示器上在线调整几个参数, 即可保证控制精度, 因而调试时间短, 容易掌握。
- **显示全面**: 控制柜面板上的文本显示器可显示各种功能, 系统任何部分出现故障均能从文本显示器上立即看到, 以便快速处理。

由“人工智能+模糊控制+变结构 PID+自学习”所构成的最新连铸机结晶器液面控制新方法, 使得塞棒控制获得突破性进展, 传统塞棒系统的优越性更进一步发挥出来, 它与滑板系统相比, 具有以下突出的优点:

- **减少用户的直接投资**: 省去了昂贵的滑板机构和滑板准备车间。据计算, 一次投资可节省数百万元。
- **减少了生产成本**: 据计算, 每百万吨钢每年可节省 500 万元。
- **减少了维护工作量**: 滑板机构的精密程度远远超过塞棒机构, 因而其维护工作量远远大于塞棒机构。
- **减少水口堵塞**: 滑板流道为半月牙水口, 容易结瘤造成堵塞。
- **减少了钢水偏流**: 塞棒水口流动形态远优于滑板水口形态, 不易偏流。
- **减少了吸气可能**: 当滑板密封不好时可能吸入空气, 影响质量。

北京亿美博科技有限公司
AEME International Corporation