

铸造生产自动化 装置与系统

[苏] К. С. 保克坦 В. Н. 高尔宾科 著
В. М. 得尼辛科 Ю. П. 卡士林

**СРЕДСТВА
И СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЗАЦИИ
ЛИТЕЙНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

机械工业出版社

铸造生产自动化装置与系统

〔苏〕 K. C. 保克坦 B. H. 高尔宾科 著
B. M. 得尼辛科 Ю. П. 卡士林

任天庆 译 黄永寿 校



机械工业出版社

资料中，对此问题没有给予应有的重视。

最近几年，工业生产中，其中也包括铸造生产广泛采用了电子计算机、机器人和机械手，显著地扩大了人们对自动化对象的认识，以及对这些对象进行直接控制的可能性。

铸造车间自动化水平还可通过广泛采用自动称量装置与定量器来提高，这些装置可直接在工艺过程中或整个车间中进行检测与控制。

毫无疑问，自动化的成功不仅与掌握系统设计原理有关，而且还决定于具体工艺过程的要求与条件的完善程度。

本书阐述了分析自动化对象的基本原理、铸造过程参数检测装置的选用、主要铸造过程中所用的自动调节原理及自动化系统的设计。主要铸造过程包括有：配料、金属熔化、铸型内液体金属的浇注及造型混合料的制备。

选用上述生产过程，主要是从自动化角度出发，它们之间有共同的特征：工艺循环（配料、熔化、浇注）的联系性和独立性，共同的质量检测方法（配料、浇注、造型混合料制备），组成多工位时用的统一原理（配料、熔化及造型混合料制备）等。

在书中，对于上述生产过程，系统地阐述了自动化对象的基本原理，自动检测、控制与调节装置的选用原则，自动化系统的设计原理，引用了国内外在配料、熔化及造型混合料制备过程中用的自动线、自动化系统及自动装置；讲述了铸造车间应用计算技术的主要趋势及生产过程的机器人化等。

译者的话

最近十几年,国内外铸造生产自动化有了较快的发展。各种自动检测装置、调节装置、自动记录装置、打印显示装置等已在铸造生产中广泛应用,尤其各种自动机、自动线也不断涌现。为了适应这种情况,广大科技工作者迫切需要一些既有理论基础,又有实际应用的专业阅读材料。但可惜的是,这方面的书籍太少。

本书在满足上述要求方面做了大胆的尝试,尽管它还不是尽善尽美的,但提供的素材还是很宝贵的,相信读者阅后会有不同程度的收获。

从全书来看,它具有下列几个特点:

1. 书的内容比较系统,章节之间有机联系,而且内容由浅入深,由一般原理过渡到具体装置及系统。如第一章,先介绍铸造生产自动化对象的特性,随后再介绍工艺参数的检测、控制与调节,最后再介绍整个自动控制系统的构成及其设计原理。

2. 作者以铸造生产中最影响铸件质量的几个工艺过程为主,对它们的自动化问题进行解剖分析,突出了重点。为了使读者深入掌握控制系统的设计原理,书中提供了很多实例,这些实例在生产实际中都被证明是行之有效的。

3. 本书内容比较新颖,反映了最新成就。书中介绍的自动检测、控制与调节装置以及自动控制系统都是工业中比较先进的技术装备。还专设一章介绍了电子计算机在铸造中的应用。

鉴于本书具有以上特点,特将它译出。但由于译者水平有限,尤其是对自动控制领域内的知识浅薄,译文中定有不少不当之处,衷心希望广大读者给予指正。

本书在翻译过程中曾得到上海工业大学张泽任副教授,吉林工业大学黄永寿副教授帮助和校对,在此表示感谢。

原 序

铸造过程自动化是提高劳动生产率,保证铸件质量和改善工人劳动条件的最有效途径之一。

近几年来,苏联对铸造生产自动化问题给予了很大的重视:完成了这方面的大量科学研究工作,在分析、设计和推广较为可靠的和高效率自动化系统、自动线或个别自动化装置等方面取得了一定成就。

但是,总的看来,铸造生产自动化水平还是低的。在铸造生产工作者面前还摆有繁重的任务,去改变这种落后状态,同时最大限度地利用构成自动化系统的理论基础,以及国内这一领域内先进企业的实际成就。

但是在实现上述任务中遇到的困难,首先是科学家、设计机关及教育部门之间在有关铸造生产过程自动化问题的情报方面缺乏充分的联系,已经发表的文章、会议文章摘要及情况报道等,只是在很窄的范围内对有关自动化问题进行了报道,而且还不系统;在大多数情况下,有关自动化问题的报道只涉及一些装置的机械结构,或者铸造车间和工部的平面布置图。这种状况很能说明下列问题,即适合铸造生产条件的自动线及自动装置的设计基础,以及可用于培养高质量工程技术人员的教材都相当缺乏。

实际经验表明,科学家、设计师及生产工作者遇到的最大困难,是在有关自动化对象的静特性、动特性分析,以及生产过程参数检测装置的选用等方面。上述一些首要问题的解决,决定着将来自动化系统的研制成果。所以产生上述困难,主要是由于铸造生产工艺过程的多样性与复杂性,缺少自动化对象的数学模型,以及变量检测传感器等所造成。

能否成功地应用近代的自动化系统设计方法,决定于对调节原理及合理系统(最佳化系统)设计原理的掌握程度。在铸造有关

目 录

原序

第一章 铸造生产自动化的对象	1
1. 自动化对象的一般特性	1
2. 炉料配料	8
3. 熔化	17
4. 混合料制备	33
5. 铸型内金属的浇注	44
第二章 铸造过程用检测装置	54
6. 主要工艺过程用的传感器	54
7. 变换器	70
8. 测量与记录仪表	79
9. 称量装置	84
第三章 控制与调节装置	90
10. 控制仪表	90
11. 调节器	96
12. 执行机构	107
13. 机器人与机械手	112
第四章 铸造过程自动化系统的设计原理	118
14. 自动调节原理	118
15. 调节系统的技术装置及其参数的选择	125
16. 控制系统的综合	133
第五章 熔化设备的备料和加料过程的自动化	137
17. 顺序式炉料定量系统	137
18. 平行式炉料定量系统	143
19. 组合式炉料定量系统	152
20. 配料过程的最佳控制	158
第六章 熔化过程自动化	163
21. 自动检测熔化过程的参数	163

VI

22. 熔化过程的自动化系统	173
第七章 砂处理过程自动化	195
23. 定量过程的控制装置	195
24. 混合料质量的自动检测和自动控制	206
25. 砂处理过程的最佳控制	216
第八章 铸型浇注自动化	232
26. 电动机械式浇注系统	233
27. 气动式浇注系统	241
28. 电磁式浇注系统	248
第九章 铸造生产的自动控制系统	256
29. 电子计算机的应用	256
30. 工艺过程自动控制系统的构造原理	264

第一章 铸造生产自动化的对象

1. 自动化对象的一般特性

自动化对象是决定自动化系统性质的主要组成部分；因此非常注意对它的研究。对象的复杂性主要决定于被研究对象的阶数和对象所完成的功能数目。

对象的研究结论应该是一些明确的建议：该对象实现自动化或半自动化的可能性，或者缺少实现自动化的必要条件。

在设计自动控制系统之前应先研究对象，以便确定它们之间的联系。通常，对象间的联系可用四个变量组的形式来表示〔56〕（图1）。

可测的干扰作用 把这些作用综合起来构成 L 维向量，即 $H = h_1, h_2, \dots, h_L$ ，一些与外界环境有关的可测变量都属于这类作用，如铸造原材料的质量指标以及影响工艺过程的各种因素。根据工艺条件，对可测的干扰作用加以限制。

控制作用 把这些作用综合起来，构成 N 维向量，即 $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ ，它们与外界环境无关而对工艺过程的影响极大。依靠控制作用可以有目的地改变工艺过程的进程。铸造生产中起控制作用的有：如冲天炉鼓风管道中调节闸门的位置，造型材料或炉料消耗量调节器（稳定器）给定装置的位置等。

输出变量 把这些变量综合起来，构成 M 维向量，即 $Y = y_1, y_2, y_3, \dots, y_M$ ，这些变量为对象的输出值，表征对象的状态并决定产品的质量指标。

不可测的干扰作用 把这些作用综合起来，构成 G 维向量，即 $F = f_1, f_2, f_3, \dots, f_G$ ，由于这样或那样的原因，如缺少传感器，而不能进行检测的干扰作用均属之。出现这种干扰的原因，可能是由于造型材料、炉料及其它铸造材料的一些质量指标测量不出来，或者由于铸造装置或设备的工艺性能发生变化，如由于

结构材料出现老化等。

研究自动化对象之间上述的联系，可能得出两种完全相反的结论：在对象的输出与输入变量间存在着严密的数学关系；或者不能用确切的数学公式来表示这些变量之间的关系。

在工艺过程自动控制的理论与实践积累了足够的经验来描述对象的状态，这时把对象做为自动控制系统中的一个环节。当已知对象的输出变量 y 与输入变量 x 间的数学关系时，可用两种主要的数学形式表示：即对象的静态特性与动态特性。

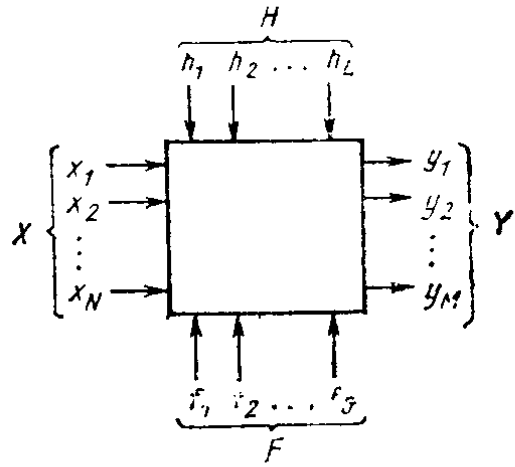


图1 对象的输入与输出

以数学公式或图表形式描述的静态特性可用来表示输出参数与输入参数之间的关系。通常，二元联系具有确切的数学表达式，例如，铸造材料称重定量器，其静态特性表达式为： $h = km$ （其中 h 为弹性元件的变形量； m 为材料重量； k 为与弹性元件材料性质有关的比例系数）。当存在几个变量时，可用诺谟图表示静态特性。对象的静态特性将决定以后自动化程序的编制。从铸造生产实际的观点来看，自动化的目的可归纳为三种类型：要求对象具有稳定的输出参数；按给定的程序改变输出参数；当过程进行的条件改变时，改变某些输出参数值。

但是，很多工艺对象由于下述原因不能用数学公式来表示：影响过程进行的互相联系的因素多；有不可测因素存在以及对过程的研究不够等。从自动化角度来看，这些是复杂对象，其复杂程度决定于对象的输入与输出的数量。在铸造生产中，很多工艺过程都属于复杂的自动化对象。这里涉及到各种铸造材料的处理过程，而影响这些过程进行的互相联系的因素较多，如炉料配料、熔化、型砂制备及浇注等过程。

铸造工艺师有时很难对上述过程中某些可变参数间的联系特

性做出确切而有根据的判断。在研究某些与传质及传热有关的过程时，常发生上述的客观困难。因此，这些过程在实现自动化时，必须做出一定的假设条件，这些条件应与自动化的主要目的相适应，也就是说，使工艺规范最大限度地接近最佳工艺规范，从而提高控制效果。

为了研究复杂对象采用的一种方法是，把对象假设为《暗箱》[18, 62]。这时只研究外部联系，不考虑系统的内部结构，即只研究对象做了什么，而不研究它怎样动作的，根据输出值随输入值变化的反应，确定对象的状态。为了研究这种对象所采用的主要手段是数理统计法。研究对象的具体步骤如下：确定主参数；建立主参数变化的分散系列；在规定的分散系列范围内，人为地改变对象的输入参数，把输出参数的所有变化记录下来；对所有结果进行统计处理。

对复杂对象实现自动控制，只有在出现小型及中型计算机后才有了可能。这些计算机输入信息的最佳形式是图表[56]。根据统计分析的结果，在图表中（图 2 a）标出输入变量 x 与 H 不同组合情况下相应的对象反应 y 。这种记录数据的方式，不仅可用做对象的模型，还可做为实现参数偏离给定值时的一种补偿手段。有了图表模型，还可以很容易解决相反的任务，即给定 H 值，求出 x 值，以保证 $y = y^0$ （此处 y^0 为输出参数的给定值）。

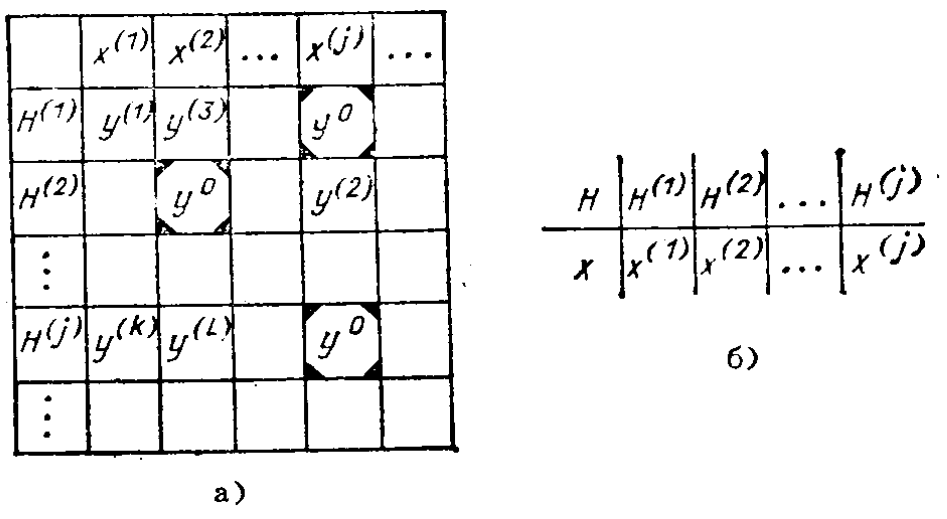


图 2 描述复杂对象的图表形式

如果控制任务是保持输出变量为定值，则可对图表进行简化（图 26），图中只标出与单一值 $y = y^0$ 相应的那些 H 与 x 的组合值。

在许多复杂情况下，必须建立对象的空间模型，为此除了采用图表模型法外，还需要建立结合工艺过程及铸造生产组织方法的信息模型〔36, 53〕。

实际上，为了控制对象并不采用组成静态特性的那些参数，或者包括在对象模型内的那些参数，而是采用这些参数偏离规定值的偏差值。这些偏差的变化称为对象的过渡过程，并且采用对象的动态特性微分方程描述。对于具有静态非线性特性 $y = \varphi(x)$ 的对象，其线性化后的动态特性微分方程可用下列代数式表示：

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_0 \Delta x + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x'} \right)_0 \Delta x' + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x''} \right)_0 \Delta x'' + \dots \\ & + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_0 \Delta y + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y'} \right)_0 \Delta y' + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y''} \right)_0 \Delta y'' \dots \approx 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_0$ ； $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_0$ 等——函数 φ 的导数，是由代入 x_0 、

y_0 值及与调定规范相应的导数初始值后求得的；

Δx ， $\Delta x'$ ， $\Delta x''$ ， $\dots$ ， Δy ， $\Delta y'$ ， $\Delta y''$ ，等——增量及各阶导数。

在自动控制理论中，线性化后的微分方程采用一定的表达式〔73〕：

1) 微分方程算符形式：

$$(T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) y = (k_1 + k_2 p + k_3 p^2) x \quad (2)$$

式中 $p = \frac{d}{dt}$ ——时间的微分算符；

$x = \frac{\Delta x}{x_0}$ ； $y = \frac{\Delta y}{y_0}$ ——变量相对增量（ Δx ， Δy 为绝对增量；

x_0 ， y_0 为参数的调定值）；

k_1 ， k_2 ， k_3 ——传递系数。

$$k_1 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_0} \cdot \frac{x_0}{y_0}; \quad k_2 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x'}\right)_0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y'}\right)_0} \cdot \frac{x_0}{y_0};$$

$$k_3 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x''}\right)_0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y''}\right)_0} \cdot \frac{x_0}{y_0};$$

T_1, T_2 ——时间常数:

$$T_1 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y''}\right)_0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_0}; \quad T_2 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y'}\right)_0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_0}$$

2) 传递函数表达式:

$$y = W(p)(x) \quad (3)$$

式中 $W(p) = \frac{k_1 + k_2 p + k_3 p^2}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$ ——传递函数。

上述线性化微分方程的表达式, 与自动化系统分类的分组原则相适应, 不仅可用于分析对象, 还可用于分析系统中的所有元件。所以在以后各章中都用它们来描述铸造生产自动化装置及其系统。

为了推导很多铸造生产工艺过程、设备和装置的动态特性方程, 可以采用这种方法, 即在推导时认为, 所有对象中物质或能量平衡的破坏, 必然伴随着储存在对象中的物质或能量和被调参数的改变。

这种对象的过渡过程可用下述方程表示:

$$A \frac{dx}{dt} = M_1 - M_2 \quad (4)$$

式中 A ——表示对象储存能量或物质能力的量值;

x ——被调参数;

M_1, M_2 ——表示输入端与输出端的量值。

把具体的参数值代入后，此方程式可化为式(2)或(3)的形式。

自动化对象的动态特性由它的一系列性质所决定，其中某些性质有利于提高控制过程的质量，而另一些却不利。

尽管铸造生产对象的性质多种多样，但可以划分出下列主要的、最有特征的性质：容量、自平衡能力及滞后。

容量——指对象储存工作介质，并把它积蓄在对象内部的能力。由于每种对象都有输出阻抗，因此它能够储存物质或者能量。在铸造生产中具有容量性质的对象有：熔炼炉、各种铁水包、混砂机、储存铸造原材料的料斗及空气压缩机等。衡量对象容量的尺度是容量系数 C ，它表示被调量改变一个量纲单位时需要向对象内输入的重量或能量：

$$C = \frac{\Delta Q}{dp_y/dt} \quad (5)$$

式中 ΔQ ——物质或能量的输入量与消耗量间的差值；

p_y ——被调参数；

t ——时间。

容量系数的量纲和被调参数的量纲有关，可以是各种各样的，例如：液体或气体的容量系数为 m^3/H ；热容量为 $kJ/^\circ C$ ；电容量为 C/V 等。

对象的容量系数越大，则被调参数的变化速度越慢。由此得出，容量系数大的对象比较容易控制。

自平衡能力——对象在没有控制装置（调节器）参与的情况下，去除干扰后对象趋向新稳定状态的能力。具有自平衡能力的对象称为静态对象，而没有自平衡能力的称为中性的，或者非静态对象。自平衡能力有利于对象控制参数的稳定，并且减轻控制装置的工作。

对象的自平衡能力用自平衡系数（程度）表示，并具有下列形式。

$$\rho = \frac{d(\Delta\lambda)}{dy} \quad (6)$$

式中 $\Delta\lambda$ ——相对干扰,由物质或能量的相对流入量与相对消耗量间的差值所决定;

y ——被调参数。

与自平衡系数有关,对象的静态特性具有不同的形式(图3)。

关系曲线1表明,在任何干扰下,对象的被控值均不变化,这种对象不需要设置控制装置。关系曲线2表示正常自平衡对象;关系曲线3表示没有自平衡能力的对象。

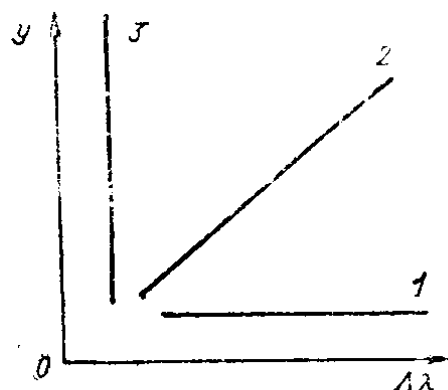


图3 自平衡系数不同时,被控参数与负载(相对扰动)间的关系
1— $\rho \rightarrow \infty$,理想的自平衡 2— $\infty > \rho > 0$,正常的自平衡 3— $\rho = 0$,无自平衡

系数 ρ 为一变量,它随负载的增加而增大,并在大多数情况下为正值。

利用下述近似方程〔44〕,足以准确地求出自平衡时间:

$$t = \frac{3T_p}{\rho} \quad (7)$$

式中 T_p ——过渡过程中的启动时间。

但是,实际上在对象中有可能出现负的自平衡。这发生在下述的情况下,即干扰去除后,物质或能量的流入量与消耗量之间产生的差值,不是趋向于自动消失,而是急剧增长,以致使过程中断。对这种对象必须进行控制。

滞后——对象平衡破坏后至被控量开始变化前,这个瞬间的时间间隔;它是由于系统具有阻力与惯性所引起。共有两种滞后形式:纯滞后(传递滞后)与过渡滞后(容量滞后),二者组成对象的总滞后。

纯滞后名称的由来,是由于在具有纯滞后的对象中,与输入作用出现的瞬间相比,在对象输出端出现反应时间的推移,而这

时外作用的大小及形式均未改变。当对象在最大负载下工作时，或者对象内信号传递速度为最大时，纯滞后为最小。

过渡滞后是物质或能量克服对象在容器之间流动时的阻力所产生的；其数值决定于容器的数目以及过渡阻力的大小。

纯滞后及过渡滞后都会使控制质量恶化，所以必须尽量使其数值减小。为此而采取的措施有：把检测与控制装置直接布置在对象附近；采用惯性小的传感元件；使对象本身结构合理化等等。

基于对铸造生产自动化对象内最重要特性及其研究方法进行分析的结果，可以归纳出一系列的要求与条件，以保证有效地实现自动化。其中最主要的是：

1) 以静态数学模型的形式描述对象的联系；对于不能用数学模型描述的复杂对象，在引入某些假设的基础上，可采用数理统计法、图表法、空间模型法以及其它研究对象联系的方法；

2) 用微分方程或图表的形式描述对象的动态特性，以研究对象的过渡过程。这时要考虑到对象的全部主要特性（容量，滞后，自平衡）；

3) 在对象内部采用这样一些技术装置，它们利用传感器检测出统一的信号，保证对象内全部有用参数变化的信息的输出；

4) 为了对对象进行控制，采用传动装置可控的执行机构；

5) 定出对象外干扰变化的准确极限；

作为附加的要求有：

1) 定出与控制任务相应的自动化边界条件；

2) 确定输入值与控制作用的界限；

3) 计算理想准则（效能准则）。

下面对铸造生产中一些主要工艺过程的自动化对象进行分析。

2. 炉料配料

在用冲天炉与电炉熔化黑色金属时，作为炉料成分的有：生铁锭、废钢与废铁、回炉料、铁合金、铁屑、矿石、氧化皮、熔

剂及焦炭。为了得到具有规定化学成分的合金，必须把炉料按一定比例加入熔化设备中。计算炉料中各成分的百分比含量时，必须确切知道它们的化学成分与产地，以及在熔化与加工过程中炉料中各种成分的变化。在这些已知数据基础上进行的炉料计算，就能保证液体金属具有严格而确定的质量，首先是在化学成分与铸造性能方面；这也就是炉料配料过程自动化的第一步。

炉料成分选择的原则是：在保证液体金属具有规定质量的同时，炉料成本应最低。

已知计算炉料的方法有三种：解析法、图表法及挑选法〔36〕。采用解析法时，按规定的液体金属成分，求出金属炉料的平均成分。如果用 x_i 代表元素在液体金属中的浓度，而烧损（掺入）的百分比以 Δx_i 表示，则该元素在炉料中的含量为：

$$x_{m_i} = x_i \frac{100}{100 \pm \Delta x_i} \quad (8)$$

随后的计算任务是确定炉料中各种料的百分比含量，以保证获得平均成分。所用公式为：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m R_i &= 1 \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m R_i x_{mj_i} &= \sum_{i=1}^m x_{mj} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中 m ——炉料中各种料的数目；

n ——合金中化学元素的数目；

R_i ——炉料中第 i 种料的重量百分比含量(%)；

x_{mj_i} ——第 i 种炉料中的第 j 种化学元素含量(%)；

x_{mj} ——炉料中第 j 种化学元素的规定含量(%)。

把已知炉料中每种料的化学元素含量 x_{mj_i} 及这些元素的规定含量 x_{mj} 代入式(9)，即可得到炉料中每种料的百分比含量 R_i 。

实际上，生产一般机械制造用的铸件时，只要按确定的化学成分中的一个元素来进行炉料计算就够了；只有对于重要的铸件

才按硅与碳进行计算。因此,采用图表法可使炉料计算工作量大为减轻〔36〕。由于硅与碳对铸铁石墨化的影响最大,因此对铸铁的性能影响也最大;故计算炉料时,对这两个元素应仔细进行计算。

计算冲天炉炉料的挑选法按如下步骤进行:根据液体金属中元素含量必需的百分比及烧损量(掺入量),用公式(8)计算出炉料中元素含量要求的百分比,随后从现有炉料中挑选炉料配比。

近几年来,在苏联及国外都采用了旨在降低炉料成本的最佳炉料算法。这种算法比传统的方法复杂,它是利用线性或非线性算法编写的程序求出最佳的方案,采用电子计算机来完成的。为了计算最佳的炉料配方必须的原始信息有:炉料的类型、化学成分及其成本,熔化过程中化学成分的变化,液体金属化学成分的界限及炉料成分的组成。实际上要保证炉料计算达到规定的精度是很复杂的,因为大部分炉料的化学成分为近似值,以致部分原始信息就不确切。为了提高计算精度,可采用预测炉料参数的方法:在已有数据的基础上,确定炉料配料过程中必要的参数,以便用于随后的计算中。

用于自动计算炉料的第一批专用计算机,是由莫斯科汽车机械学院和梯比里斯仪表制造及自动化装置科学研究所研制出来的,并在库塔伊斯基汽车厂进行了试验。这些计算机可用于工艺过程的初步研究,并可作为研究控制机的基础,以实现铸铁熔化过程的综合自动化。为了计算炉料,可采用多功能电子计算机〔55〕。

炉料中各种料的一次加料量计算出来后,送入自动定量系统及熔化设备加料系统的给定程序部件中。

炉料配料过程作为自动调节对象时的一般简图如图4所示。

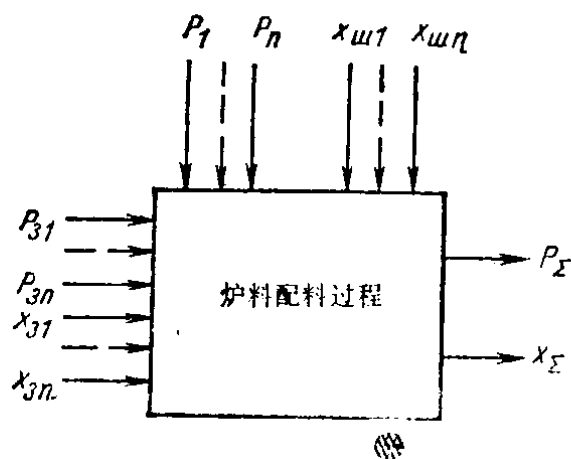


图4 炉料配料过程的一般简图