

热工过程自动调节

理論基础

С. Ф. 齐斯加可夫讲

高等教育出版社

5



热工过程自动调节

理论基础

C. Ф. 齐斯加可夫讲
吳勉译

高等教育出版社

本书系根据苏联专家齐斯加可夫(С. Ф. Чистяков)同志于1957年在清华大学动力机械系自动化教研组为教师、进修教师、研究生讲课时所写讲义译出。

全书共分十九章。前八章主要论述热工过程调节的理论基础,包括无反馈、刚性反馈、弹性反馈、以致测量导数作为冲量的调节过程,而从第九章起则结合热工对象特点阐述调节原理及非线性调节过程。

本书可作为高等工业学校讲授“热工过程自动调节”课用的教材,同时也适合于电站、化工、石油、冶金等部门热工控制技术人员和工人作为参考之用。

热 工 过 程 自 动 调 节

理 论 基 础

С. Ф. 齐斯加可夫讲

吴 勉 译

高等教育出版社出版 北京宣武门内承恩寺7号
(北京市书刊出版业营业许可证出字第054号)

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店发行

统一书号 15010·854 开本 850×1168 1/32 印张 10 7/16
字数 271,000 印数 1—4,000 定价 (5) 1.60
1959年12月第1版 1959年12月上海第1次印刷

中 譯 本 序

“热工过程自动调节理論基础”是作者在 1956—1957 年間在清华大学講課时所写下的讲义。自动调节理論正在不断地发展和日趋完善。目前,在苏联高等学校,讲授这些問題的大綱和程序有了一些变化。但是基本原理还没有改变,因此讀者仍然可以从本书开始来研究热工过程自动调节理論。讀者理解了本讲义中所有的基本規律以后,不难从 1957 年以后这一方面的最新著作中找到一些补充資料。

中国朋友們正在为了在最短时期內建立具有世界先进科学技术水平的强大社会主义工业而进行着巨大的工作,如果本书能对你們的工作有些微帮助的話,作者将感到十分荣幸。

С. Ф. 齐斯賈柯夫 1959 年 11 月 29 日于莫斯科

序

本书原文是苏联莫斯科动力学院 С. Ф. 齐斯賈柯夫(С. Ф. Чистяков) 副教授 1956—1957 年对清华大学动力系热力設備自动化教研組教师讲授这門課时的讲稿。

本书內容分两部分:第一部分(从第一章到第七章)讲述简单热工对象的自动调节理論;第二部分(从第八章到第十九章)結合热工对象的实际特点用頻率法讲述自动调节原理。

本书可作为高等学校有关热工过程自动化方面的教学参考书,也可供从事这方面工作的工程技术人员工作中的参考。

由于各方面需要,原印讲义早已分发完,但到现在为止函索者仍不少,故征得专家同意不加修改或补充以讲义形式出版,以滿足讀者需要。意見請寄高等教育出版社或清华大学动力系热力設備自动化教研組。

清华大学动力系热力設備自动化教研組 1959 年 12 月 17 日

目 录

結 論	1
第 一 章 自动調节的一般概念和任务	9
第 二 章 調节对象及其特性	16
第 三 章 无反饋的調节过程	38
第 四 章 具有剛性反饋的調节过程	51
第 五 章 以被調量导数作为冲量的調节过程	70
第 六 章 具有彈性反饋的調节过程	78
第 七 章 調节器的近似計算	91
第 八 章 热力过程自动調节实际系統的若干特点及其研究	103
第 九 章 自动調节系統的組成环节及其主要特性	114
第 十 章 环节的开口連接与閉合連接以及其傳遞函数	130
第十一章 頻率特性的基本概念	141
第十二章 調节系統的稳定性	165
第十三章 热力調节对象的特点	191
第十四章 热力調节对象自动調节器的特点	203
第十五章 調节过程品質的近似評定	225
第十六章 自动調节器最佳整定参数的近似計算法	249
第十七章 調节对象及調节器动态特性的試驗确定方法	276
第十八章 調节系統的若干非綫性的因素及考虑其影响的方法	296
第十九章 双位調节及其特点	318
結束語	323
附 录	324
主要参考书刊	330

緒 論

在世界各国的一切工业部門中生产过程自动化得到了蓬勃的发展,这是由于現代工业生产的一般技术水平已大大提高了的缘故。

在技术发展的早期,生产主要是依靠人工劳动,依靠工人的技能。在这种情况下要来談自动化是为时过早的,并且也是无的放矢的。只是随着工业生产的发展,随着生产过程机械化的出現,才开始提出了个别生产工序自动化的建議。

生产过程机械化就是以各种机器和机械装置来代替人的体力劳动。在机械化的生产过程中看管人員无需直接去完成各种生产工序,而只需操縱它們。例如在起重机上重物不是由人而是由电能或其他机械方法提升上去的。人只是操縱机器的工作,而不直接提升重物,在这里生产过程是机械化了。

生产过程自动化是更深刻和更完善了的机械化,在自动化的生产过程中不仅是主要的生产工序,而且連生产工序的控制也都机械化了。应当指出,机械化生产过程的控制通常不要求进行沉重的体力劳动,但却要求进行脑力劳动。因此自动化也就把人的脑力劳动的某些部分机械化了。例如,如果起重机能在沒有人干預的情况下把重物提升到规定的高度,那么也就可以把这种起重机称为自动化的起重机。在技术上完全有可能造出这种自动化的起重机,但是在工程中这种机器是非常少見的。在提升重物时常常采用机械化但却很少采用自动化的这一情况說明了,只有在一定的条件下采用自动化才是合理的。如果这些条件不存在,那么采用自动化装置是不必要的,也是不合理的。

自动化装置是指一整套不同的装置而言。在热力工程中自动化装

置包括：自动調節裝置、遠距控制裝置、熱工保護裝置、工藝信號裝置、熱工檢查裝置等等。听课的同志們都已經很熟习这些裝置了，因此在这里也就不加詳細說明。在这些裝置中最重要的是自动調節裝置，以后我們要討論得最多的也就是自动調節裝置。但不能認為，實施了自动調節以后，我們就已經解決了生產過程自動化的任務了。工作還不限于此，这里面总是還需要有其他裝置的配合，否則自動化就將是不完整的。

為了更清楚地了解：是哪些條件決定了必須採用自動化裝置，就應當研究一下它的歷史。

在遠古時期人們就已經知道自動化裝置。但是如果不把鐘表計算在內。那麼遠古和中古時期的自動化裝置是沒有什麼實際意義的，當然更談不到工業上的意義了。

在熱工設備中，具有工業上意義的第一批自動化裝置是熱工保護裝置。巴班(Papin)在1680年所發明的安全閥應當被認為是在蒸汽鍋爐上採用的第一個自動化裝置。這個熱工保護裝置很快地就成為一切蒸汽鍋爐所必須具備的附件。自從巴班的汽鍋(更確切地說是銅罐)在1707年發生了第一次的爆炸事故(在此事故中有幾個人死亡)以後，人們就完全体会到了採用安全閥的必要性。在當時發生了許多次汽鍋爆炸的事故，尤其是因水位降得過低而引起的爆炸事故。這種情況就引起了其他熱工保護裝置的出現和採用。

其他自動化裝置，特別是熱工檢查裝置的採用是進行得很緩慢的。例如在100年以前汽鍋中的水位大多是用試驗旋塞來測知的，而且為了推廣象水位玻璃這樣一種簡單的測量裝置也不得不進行大力的宣傳。在1846年布尔东(Bourdon)就已經提出了管簧式壓力表，但是這種壓力表却長期沒有得到應有的推廣採用。在俄國只是從1890年起才規定了在蒸汽鍋爐上必須採用壓力表。在美國也是在1890年以後很久才把壓力表的應用在法律上固定下來。

自动調节裝置在工业中的采用,也是經過了独特的发展道路的。

世界上第一个工业用自动調节器是俄国卓越的机械师波尔祖諾夫(И. И. Ползунов)在1766年所发明的鍋炉給水調节器,这个給水調节器是波尔祖諾夫为自己的“火力机”創制的。晚些时候在1784年瓦特(James Watt)发明了蒸汽机的轉速調节器。瓦特的調节器的作用原理和波尔祖諾夫的調节器相似。經過若干年以后,瓦特也在自己的鍋炉中采用了浮子式水位調节器。

第一个燃燒自动調节器,更正确地說是蒸汽压力調节器,是俄国的发明家施巴柯夫斯基(А. И. Шпаковский)在1864年創造的,用来控制液体燃料噴燃器。这种調节器是直接作用式,它用薄膜来感受汽鍋中的蒸汽压力,并根据蒸汽压力的大小来移动調节閥而改变燃料的噴入量。

法国人貝尔維叶(Belville)在1867年发明了层燃炉的蒸汽压力調节器。这个調节器也是直接作用式的。它根据蒸汽压力自动地改变鍋炉的通风量。

但是在十九世紀只有轉速調节器得到了很快的发展和改善。其他热工过程用的自动調节器几乎都沒有得到采用。当时沒有装轉速調节器的固定式蒸汽机和其他发动机是很少見的,但只有給水調节器的蒸汽鍋炉却也只是一种例外。至于燃燒过程調节器,那么可以說施巴柯夫斯基和貝尔維叶的調节器已經被人遗忘了,甚至在二十世紀初期,这些調节器也还没有得到采用和摹仿。

根据上述情况就发生了这样一个問題:为什么轉速調节器得到了很大的发展,而其他的調节器却实际上沒有得到采用呢?为了回答这个問題,首先需要了解是哪一些条件决定了必須采用自动化,特别是生产过程的自动調节。这些条件就是:

- (1) 生产过程是机械化了;
- (2) 生产是連續的(流水式的);

- (3) 生产过程的进行速度是較高的；
- (4) 不可能或很难客觀地評定該过程的主要指标；
- (5) 要求很准确地保持該过程主要指标的数值。

这些条件在蒸汽机中是存在的,但在过去的蒸汽鍋炉中却几乎全部是不存在的。例如,蒸汽机的工作是全部机械化了,并且可以在相当长的時間内連續进行。在工况改变时蒸汽机內过程的进行速度是相当高的,而过程的主要指标——轉速則很难客觀地求出。对維持轉速为一定的要求是很高的,尤其当蒸汽机广泛应用于紡織工业中以后,这种要求就更加提高了。在这种情况下,蒸汽机自动控制的必要性,也即采用自动調节器的必要性,已經是无可爭辯的了。

对于十九世紀末叶和二十世紀初期的蒸汽鍋炉來說,情况是两样的。鍋炉的工作过程主要由两个指标即鍋筒中的水位和汽鍋蒸汽压力来表征。

在当时根据水位来控制的鍋炉給水过程一般是不連續的。这是由于过程的进行速度,即水位的变化速度很低的緣故。用水位玻璃来測量水位没有什么困难,而水位又可以允許有相当大的波动。

在不久即將出版的“苏联动力技术史”第一卷中有一个表說明了各种蒸汽鍋炉的給水情况。下面就是該表的摘引。

表 1 中的 t_1 是：在設計蒸汽产量下当給水完全停止时鍋筒中水位降低 100 毫米所需的时间。

对于典型的十九世紀鍋炉——圓筒式和兰开夏式鍋炉——來說, t_1 時間是很大的,因此过程的进行速度是微乎其微的。在 30 年以前兰开夏鍋炉在俄国还有很广泛的应用。对于更新型的鍋炉來說, t_1 减小到了几十和几百分之一。从这里也可以看出,为什么在十九世紀給水調节器并不是鍋炉必不可缺的,而它又为什么逐漸变成了現代鍋炉所必需具有的元件。

在燃燒过程的調节方面,情况也与上面所說的相似,在旧式鍋炉中

燃料的燃燒過程是在沒有機械化的人工燒火爐中進行的，燃燒過程是不連續的。鍋爐具有很大的儲蓄能力，因此也沒有促進燃燒過程的自動化。

表 1. 各種鍋爐的給水情況

№	鍋 爐 型 式	受熱面 米 ²	設 計 蒸 汽 產 量 噸/小 時	蒸 汽 工 力 壓 力 公 斤 / 厘 米 ²	蒸 發 面 以 上 的 鍋 筒 數 目	時 間 分	備 注
1	圓筒式鍋爐	28	0.42	5.0	1	196.0	
2	雙火筒蘭開夏式鍋爐	120	3.0	9.0	1	39.5	
3	巴布考克-威爾考克斯式水管鍋爐	515	15.5	18.0	2	6.1	鍋筒是縱向放置的
4	加爾別式四鍋筒立式水管鍋爐	800	32.0	18.0	2	3.6	
5	列寧格勒金屬工廠三鍋筒立式水管鍋爐	1500	90.0	32.0	2	1.40	
6	塔干羅格鍋爐製造廠單鍋筒立式水管鍋爐		160.0	34.0	1	0.55	TKH-3型
7	列寧格勒金屬工廠單鍋筒立式水管鍋爐		200.0	100.0	1	0.26	1944 年設計的

在“蘇聯動力技術史”中另外有一個表說明了各種鍋爐的蒸汽儲蓄能力。下面的表 2 是該表的一段摘引。

表 2 中的 t_2 時間代表汽鍋的儲蓄能力，它是在設計蒸汽產量下燃料燃燒完全停止時汽鍋內蒸汽壓力降低 20% 所需的時間。顯然，當燃燒完全停止時，鍋爐是借助於降低汽鍋中水的焓來繼續產生蒸汽的。

從表 2 中可以看出，在十九世紀的典型鍋爐中壓力降低所需的時間是很長的。而且實際上所需的時間還要比表上所列的數字更大，因為對於層燃爐來說，燃燒完全停止的情況實際上是很少有可能發生的。對於儲蓄能力很大的鍋爐來說，即使是燃燒過程的部分自動化（即根據

表 2. 各种鍋炉的蒸汽儲蓄能力

№	鍋 炉 型 式	受热面 米 ²	設計蒸汽 产量 吨/小时	蒸 汽 工 作 压 力 公斤/厘米 ²	時間 t_2	備 注
1	圓筒式鍋炉	28	0.42	5.0	26.6	
2	双火筒兰开夏式鍋炉	120	3.0	9.0	8.5	
3	加尔別式四鍋筒立式水管 鍋炉	800	32.0	18.0	1.95	
4	塔干罗格鍋炉制造厂单鍋 筒立式水管鍋炉		160.0	34.0	0.53	TKH-3型

蒸汽压力来自动調节通风)也沒有实际的必要。

由此可見,对于十九世紀的鍋炉來說,并不存在客觀上必須采用自动化的条件。这一点可以說明,为什么过去那些远远超越当时技术水平的天才发明沒有得到实际的应用。只是随着主要設備的构造的发展,随着它們工作指标的改变,才提出了也在鍋炉中采用自动調节装置的现实任务。虽然蒸汽鍋炉的自动調节器比蒸汽机的自动調节器更早出現,但只是当相应的条件出現了以后蒸汽鍋炉的自动調节才得到广泛的采用。自动化的采用首先决定于客觀的必要性。自动化在技术經濟方面的优点只是起促进其应用的作用,它絕不是主要的推动力。

从二十世紀开始由于水管鍋炉得到越来越多的采用,由于鍋炉的容量不断增大。因而装用給水自动調节器的鍋炉就逐漸增多。現今,根据苏联 1953 年新的“发电厂运行規程”的規定,在蒸汽产量超过 20 吨/小时的所有鍋炉上都必須装設鍋炉給水自动調节器。在 1953 年通过了关于在一切电厂中取消看水这一职务以及只从鍋炉总操作地点观察鍋筒內水位的决定。这一措施証明了,在現代高生产量鍋炉的最要害处自动調节装置的工作是可靠的、有效的和重要的。

自从施巴柯夫斯基和贝尔維叶发明了燃燒过程自动調节器以后,

一直到二十世紀的二十年代以前，這些調節器都沒有得到採用。經過了長時期的中斷以後，從 1919 年開始在文獻中才重新出現了燃燒過程自動化問題的討論。這是由於鍋爐蒸汽產量增加了，儲蓄能力相應地減小了，以及由於爐內過程廣泛地進行了機械化，採用了機械化層燃爐和煤粉室燃爐的緣故。在 1921 年，美國愛迪生公司懸賞徵求最好的燃燒過程自動調節器，並提供了自己工廠所出產的鍋爐作為各種調節器的試驗之用。這一件事在美國大大推動了燃燒過程自動調節的發展和應用。在 1924 年德國西門子和阿斯卡尼亞公司在鍋爐上裝設了第一批自己設計的燃燒過程調節器。

在那個時期，蘇聯剛結束了國內戰爭和反對外國干涉者的戰爭。當時蘇聯的技術水平還大大地落後於外國，只是到了 1930 年才出現了第一個燃燒過程半自動調節系統。在 1933 年安裝了第一套外國製造的燃燒過程自動調節系統。而從 1936 年起才開始安裝蘇聯自制的整套燃燒過程自動調節系統。以後，由於蘇聯儀表製造業的迅速發展，燃燒過程自動調節系統開始得到迅速的推廣。目前根據 1953 年蘇聯新的“發電廠及電網運行規程”的規定，凡蒸汽產量大於 35 噸/小時的鍋爐都必須採用燃燒過程自動調節。

其他熱工參數自動調節在蘇聯的發展首先決定於蘇聯儀表製造業的能力。隨著儀表製造業能力的增長，自動調節器在工業中的應用也增多了。目前在許多情況下，蘇聯在自動調節器的採用方面超過了其他國家的技術水平。

中華人民共和國今天已走上了迅速提高工業技術水平的道路。在中國共產黨第八次全國代表大會上提出了要在三個五年計劃之內爭取在許多最重要的科學和技術部門儘快地接近世界先進水平。這就使得我們可以相信，在最短的期間內自動化，其中也包括熱能動力裝置自動化，在中國將得到應有的發展。

在結束熱能動力裝置自動化一般問題的討論以前，還應當指出一

个重要的情况。我們知道,工业主要設備(包括鍋炉和其他工艺設備)构造的发展造成了应用和发展自动化裝置的必要。但自动化裝置的发展同时也反过来影响主要設備的构造。例如上面所說过的在苏联关于取消鍋炉看水专职的决定,在許多情况下要求改造鍋炉的給水綫路。滿足人工操作时运行要求的那种給水綫路布置方案,当完全过渡到給水自动調节时就变得不方便了。上述給水綫路的改造只是不大的一种改变,但从这一类小改变逐渐会形成一开始就根据自动控制設計的新型鍋炉。自动化裝置正在逐漸地从主要設備的附加裝置变成主要設備的有机組成部分。一开始就根据自动控制的要求設計的生产設備无疑是与根据人工操縱設計的旧式設備不同的。

自动化一般問題的討論就此結束,下面开始讲热工过程自动調节原理的主要問題,这部分課程的份量与鍋炉設備自动調节普通課程的相应部分相等。

第一章 自动調節的一般概念和任务

任何一个生产过程可以用一个或几个量来表征。这些量的变化就表示了在生产过程中所发生的变化。表征正在进行着的生产过程的量通常就称为被調量。例如冬天的室内温度就很好地表示出室内供暖过程的情况。

可以认为,汽鍋內的蒸汽压力也很好地表出蒸汽鍋炉的工作情况,表示出其内部所发生的热交换过程的情况。但要控制蒸汽鍋炉内部的生产过程仅仅根据一个被調量(蒸汽压力)是不够的,而还需要观察其他几个量的变化情况。

控制生产过程就在于使被調量或者保持不变或者按一定的規律变化。这种控制的过程就称为調節。如果調節过程沒有人参加进去,那么这种調節就是自动調節。因此自动調節就是在无人参加的情况下能够以规定的准确度使一个或几个被調量保持不变或根据一定的規律变化的过程。

被調量只能在一定的有限区域内表征生产过程。例如某一房間内的温度不能表示整个房屋供暖过程的情况。被調量所表征的生产过程的那一区域称为調節区域。同一生产过程的各个調節区域的总和称为調節对象。有时候調節对象只包括一个調節区域,于是这两个概念就成为等同的了。

調節区域通常被限制在調節机关与造成某种外来作用的机关之間。图1所示是調節区域的示意图,其中的生产过程是用最简单的調節器进行控制的。作用于調節区域的外来影响不一定要由机械装置所造成,例如在室内温度的調節过程中作用于調節区域的外来影响是由

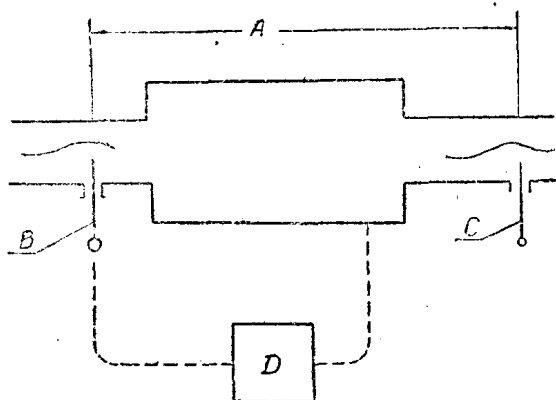


图1. 具有最简单调节器的调节区域:

A—调节区域的长度(界限); B—调节机关; C—造成扰动的机关; D—自动调节器。

外界大气条件的改变所引起的。

作用于调节对象或调节区域(在某些情况下则是作用于调节器)而与调节量数值无关的,外来影响或外来影响的变化称为扰动。

在稳定状况下,调节对象中的被调量数值是固定不变的。这就表明了,输入调节区域的物质或能量的数量等于输出调节区域的物质或能量的数量,简言之,即流入量等于流出量。由于扰动的结果,流入量与流出量之间的平衡关系被破坏了,被调量就开始改变。被调量的变化引起自动调节器(简称调节器)的反应。调节器就相应地移动调节机关以使流入量等于扰动后流出量所达到的新值。

当新的平衡状态重又建立以后,流入量又等于流出量了,那时候被调量就将停止变化。随着所用的调节器构造的不同,在新的平衡状态下被调量或者回复到原来的数值,或者变到另一个新值。在后一种情况下被调量的新值通常是物质或能量的流过量的函数,或者是调节机关开度的函数。

如果在任何稳定平衡状态下被调量的数值都保持不变,那么这种调节过程称为无差调节过程(图2)。如果在各种稳定状态下被调量的

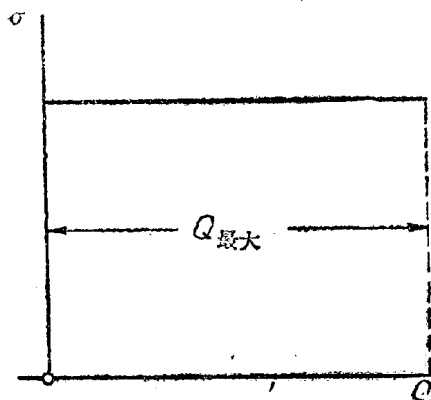


图 2. 在无差调节系统中在各稳定平衡状况下被调量 σ 与被调介质流量 Q 之间的关系。

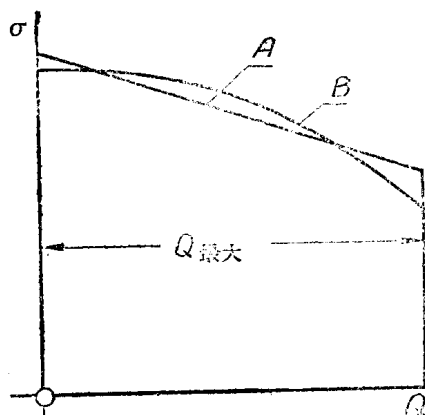


图 3. 在有差调节系统中在各稳定平衡状况下被调量 σ 与被调介质流量 Q 之间的关系：
A—线性关系；B—非线性关系。

数值各不相同，则这种调节过程称为有差调节过程（图 3）。

为被调量所表征的、流过或位于调节对象（区域）之中的物质或能量称为被调介质。

如上所述，调节过程就是在保持被调量为给定数值的条件下使流入量和流出量互相平衡或者说使其稳定的过程。在调节过程中被调量或者保持不变，或者是被调介质流过量的函数或调节机关开度的函数。

在热工过程中上面所讲的这种调节过程是最常遇到的。但在某些情况下还采用一种调节，即循序调节。在循序调节中被调量应按照一定的规律随时间而变化，也就是说被调量是时间的函数。在工业热能设备中，尤其是在工业炉、干燥设备及其他大多是周期性工作的设备的温度调节中会遇到必须采用循序调节的情况。图 4 是循序调节图的一个例子。在此调节过程中，材料的加热速度、最高温度的保持时间以及各个不同时期的冷却速度都是规定好了的。循序调节曲线可以有各种各样的形状。

在热力工程中，很少会遇到随动调节系统（或称跟踪调节系统）。

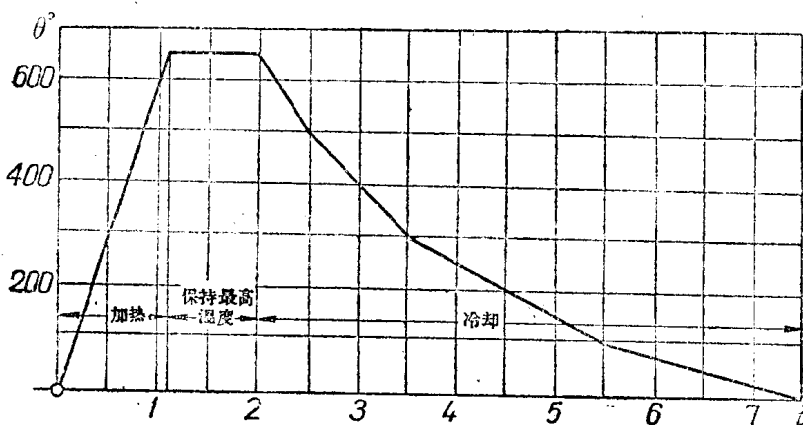


图4. 循序调节图举例:

 θ —材料温度; t —时间。

在随动调节系统中调节机关是直接随着调节区域外的作用量而移动,而此外界作用量的变化是不能预先估计的。显然,在这种情况下不能要求调节系统能很严格地保持被调量为给定的数值。此时调节系统只能使被调量不超出一定的范围之外。

下面我们要讨论的是在热力工程中应用得最广泛的调节过程,即被调量保持为规定数值的那种调节过程。

当稳定的平衡工况遭到破坏时,就要求调节器起作用。稳定状况指的是工况性质不随时间而变化的那一种工况。平衡状况是稳定状况的特殊情况,但却是很常遇到的一种稳定状况。在平衡状况下被调量不发生变化,调节机关也不移动。

从一个稳定状况(或平衡状况)转变到另一个稳定状况(或平衡状况)的过程称为过渡过程。过渡过程应满足下面两个一般要求:

- (1) 过渡过程必须是稳定的;
- (2) 过渡过程应满足给定的调节品质指标。

如果在任何扰动下被调量都永远能达到新的稳定状况,那么这种过渡过程就称为稳定的过渡过程。随着调节器特性及其整定参量的不