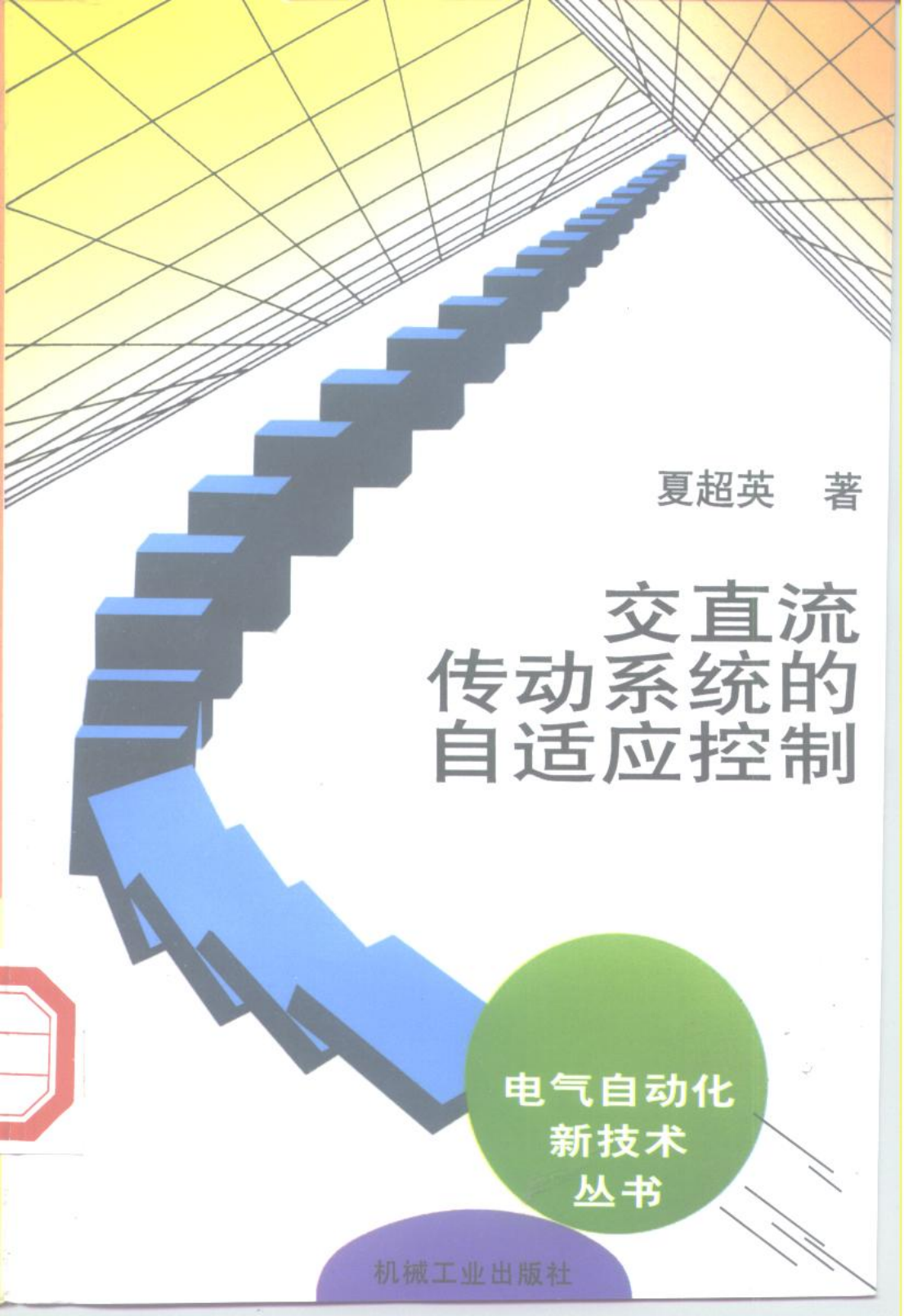




夏超英 著

交直流 传动系统的 自适应控制



电气自动化
新技术
丛书



机械工业出版社

411242

电气自动化新技术丛书

交直流传动系统的自适应控制

夏超英 著



机械工业出版社

2484/18

十几年来,电力电子和微电子技术的迅速发展,使得交直流传动系统的自适应控制问题越来越引起人们的重视,国内外的许多学者对其投以了极大的关注。本书以正实误差传递函数条件下的参数调整算法为主线,系统地介绍了交直流传动系统中,被控对象参数未知或发生未知变化时,自适应问题的研究方法、最新研究成果和本书作者在这方面所做的工作。全书共七章,主要内容包 括正性系统理论,正实误差传递函数条件下的参数调整算法和 CY 猜想,直流传动系统的自适应控制,笼型感应电动机磁链的自适应观测和参数辨识方法,矢量控制系统的参数自适应设计方案等。

本书以电气传动自动化领域的工程技术人员和研究人员为主要读者,也可作为高等院校电气自动化专业的教师、研究生和高级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流传动系统的自适应控制 / 夏超英著. —北京:
机械工业出版社, 1998. 5
(电气自动化新技术丛书)
ISBN 7-111-06086-5

I. 交… II 夏… III. ①交流电传动-自适应控制②直流电传动-自适应控制 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 01021 号

出版人: 马九荣(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 孙流芳 周娟 版式设计: 王颖
封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光
北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行
1998 年 5 月第 1 版第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32 10.125 印张 260 千字
0001-4000 册
定价: 22 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子和计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设需要。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委 员：（以下以姓氏笔划为序）

王 炎 王文瑞 王正元

刘宗富 孙 明 孙武贞

孙流芳 过孝瑚 许宏纲

朱雅清 夏德铃 陈伯时

陈敏逊 李永东 李序葆

张 浩 张敬民 周国兴

涂 健 蒋静坪 舒迪前

喻士林 霍勇进 戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所
深圳华能电子有限公司
北京电力电子新技术研究开发中心
天津普辰电子工程有限公司
中国电工技术学会

前 言

在过去的十几年中,自适应控制的理论和方法得到了长足的发展,其理论性问题和一般规律人们已经基本掌握,下一步的工作是实际应用。原则上说,具体应用较之于一般理论更丰富,因而也就更复杂,所以这方面的工作还十分艰巨。

另一方面,随着人们社会实践活动的不断深入,尤其是电力电子和微电子技术突飞猛进的发展,对于那些具有未知和不确定因素的被控对象来说,控制系统的设计方法严重制约其性能进一步提高的问题日益突出起来。那种在原有方法基础上的修修改改似乎难以从根本上解决问题,必须寻求新的理论依据和新的设计方案。

现有的一些自适应控制的理论和方法,提供了解决这类具有未知和不确定因素的被控对象的控制问题的一种途径,但它并非是一种灵丹妙药。某个具体的自适应控制方案,在实际中应用的成功和失败,除和问题本身的特殊性有关以外,还取决于设计者对这种特殊性了解的深入程度,以及解决问题的方法选择得是否得当。

自适应控制不会像反馈控制那样在自动控制系统的设计中尽而用之,有效性是首先需要加以认真考虑的。人们往往存在这样的疑虑,在自适应控制和其他反馈控制之间,哪个更为有效,或者说在什么情况下采用自适应控制才是有效的。因为反馈控制的尽人皆知的性能,是使闭环系统的运行状态不受环境条件的影响,所以人们的这种疑虑是很自然的。对于这一问题的一个恰当的回答是,只有当被控对象的不确定性使得控制系统的性能受到严重影响时,才考虑使用自适应控制。

其次,就是复杂性问题。在解决控制系统的自适应问题时,如果方案的复杂程度的增加未能换取系统性能的同步提高,那么这一方案的实际价值就有可能成为问题。控制系统中的非理想和不确定因素一般是复杂和多样的,自适应控制只能针对其中最主要和最关键的问题进行。对于不同的实际问题,如何寻求简单实用的自适应控制方案,是自适应理论研究和应用研究的一项重要内容。

基于上述看法,在本书中交流传动系统的自适应控制问题占了较大的比重,因为在实际应用中,人们更强烈地感觉到了解决这一问题的重要性。和直流传动系统的情况有所不同,交流传动系统的自适应控制问题要复杂和困难得多,摆在大家面前的许多问题还不是十分明了或未能找到满意的解决方案,有许多工作需要去做。

本书并不试图涉及自适应控制的各种方法。在自适应控制系统的诸多设计方案中,以正性系统理论为基础的设计方法是最为基本的。机电控制系统的特点是有确定的被控对象,虽然其参数会随工况发生变化,但其结构一般是不变或已知的,除负载干扰之外的其他随机干扰可以限制在一定范围之内,对控制算法的实时性要求很高。据此,本书在内容安排上有如下特点:

(1) 以正实误差传递函数条件下的自适应算法作为主线,紧扣交直流传动系统的自适应控制这一主题,同时也使读者对本领域的其他研究方向及其主要成果有一个大概的了解。

(2) 力求使理论证明的严密性和简洁实用性达到完美的统一,充分考虑到自适应算法实现上的复杂程度可能对实际效果带来的不利影响,主要介绍那些从应用角度来看更有价值的内容。

(3) 注意内容的系统性和连续性,重点放在不同方法的分析比较上,对主要的设计方案应给出性能特点的评价。

(4) 本书是在作者研究工作的基础上写成的,一些主要内容都有系统设计实例或充分的仿真研究结果,因而可供读者作为进一步研究的参考。

两年的研究工作加上一年多的写作终于成就了这本书，在它即将和广大读者见面之际，作者谨向在本书写作过程中，给以关心和鼓励的《丛书》编委会的同志们，向天津电气传动研究所的喻士林老师，向国家自然科学基金委员会的黄斐梨老师，向机械工业出版社的同志们表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不免有欠妥和谬误之处，衷心希望读者给予批评指正。

作者

1997年12月于天津大学

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

第1章 绪论

- 1.1 自适应控制的任务..... 1
- 1.2 自适应控制系统的类型..... 4
- 1.3 交直流传动系统中的自适应问题..... 10
- 1.4 本书的内容和阅读指导..... 13

第2章 正实误差模型条件下的参数调整算法

- 2.1 正实函数和正实函数矩阵..... 16
 - 2.1.1 正实函数..... 16
 - 2.1.2 正实函数矩阵..... 17
- 2.2 正实引理..... 19
 - 2.2.1 连续时间系统的正实引理..... 19
 - 2.2.2 离散时间系统的正实引理..... 20
- 2.3 连续时间系统的误差模型..... 22
- 2.4 离散时间系统的误差模型..... 27
- 2.5 超稳定性理论..... 30
 - 2.5.1 超稳定性的概念和定义..... 31
 - 2.5.2 超稳定性定理..... 33
- 2.6 参数调整算法的扩充..... 36
- 2.7 多综合点的误差模型和参数调整算法..... 41
 - 2.7.1 线性孤立部分传递函数为正实的充分必要条件..... 41
 - 2.7.2 一些相关结论..... 49
- 2.8 CY猜想..... 51

第3章 直流传动系统的自适应控制

3.1 模型参考自适应控制的Narendra方案.....	54
3.1.1 问题的描述.....	54
3.1.2 自适应控制器的代数结构.....	55
3.1.3 被控对象的相对阶数等于1的情况.....	59
3.1.4 被控对象的相对阶数等于2的情况.....	62
3.1.5 被控对象的相对阶数的大于等于3的情况.....	65
3.1.6 问题讨论.....	71
3.2 双闭环调速系统自适应的Narendra方案.....	78
3.3 Goodwin算法.....	84
3.3.1 问题的描述.....	84
3.3.2 Goodwin关键性技术引理.....	86
3.3.3 Goodwin自适应算法1.....	87
3.3.4 Goodwin自适应算法2.....	91
3.3.5 Goodwin自适应算法3.....	93
3.4 离散时间模型的逆稳定性问题.....	95
3.5 直流调速系统自适应的Goodwin算法.....	101
3.6 极点配置自校正控制.....	106
3.7 无纹波有限拍自校正控制.....	111
3.8 讨论和总结.....	113
第4章 笼型感应电动机和磁场定向控制策略	
4.1 三相感应电动机的数学模型.....	116
4.1.1 三相感应电动机的基本方程.....	116
4.1.2 两相系中三相感应电动机的模型.....	118
4.2 感应电动机的状态方程描述和可控可观性分析.....	123
4.2.1 感应电动机的状态方程描述.....	123
4.2.2 可控可观性分析.....	128
4.3 转速为常值时感应电动机的传递函数.....	131
4.3.1 静止坐标系中的情况.....	132
4.3.2 转子坐标系中的情况.....	133

4.4	磁链的Luenberger观测器设计.....	136
4.4.1	转子磁链的Luenberger观测器设计.....	136
4.4.2	定子磁链的Luenberger观测器设计.....	140
4.5	磁场定向原理和矢量控制系统.....	146
4.6	定子磁场定向的矢量控制系统.....	152
4.7	磁链和转矩开环控制的矢量控制系统.....	158
第5章	感应电动机定子磁链的自适应观测	
5.1	矢量控制系统对电动机参数的依赖性.....	160
5.2	感应电动机转子参数的合理假设条件.....	165
5.3	参数全部未知时转子磁链的自适应观测.....	174
5.4	部分参数已知时转子磁链的自适应观测.....	186
5.5	感应电动机定子磁链的自适应观测.....	194
5.6	用反电动势信号校准转子时间常数.....	201
第6章	感应电动机参数的辨识方法	
6.1	感应电动机的零极点和静态等效电路.....	209
6.1.1	感应电动机的零极点分布.....	209
6.1.2	感应电动机的静态等效电路.....	215
6.2	感应电动机参数离线辨识的阶跃响应方法.....	216
6.3	恒速运行时感应电动机参数的辨识方法.....	221
6.3.1	转速恒定未测知时感应电动机的参数辨识.....	223
6.3.2	转速恒定已测知时感应电动机的参数辨识.....	226
6.4	变速驱动时感应电动机参数的辨识方法.....	234
6.4.1	静止坐标系下的辨识算法.....	234
6.4.2	转子坐标系下的辨识算法.....	240
第7章	自适应控制的交流传动系统	
7.1	拥有转子磁链自适应观测器的矢量控制系统.....	245
7.2	带有参数辨识器的参数自校正矢量控制系统.....	254
7.3	转子时间常数自校准的矢量控制系统.....	258
7.4	无速度传感器矢量控制系统的转速推算原理.....	266
7.5	无速度传感器矢量控制系统的设计方法.....	275

7.6 无速度传感器矢量控制系统的参数自适应.....	281
7.7 讨论和总结.....	285
附录	
附录 A 转子坐标系下转子磁链自适应观测器仿真程序.....	290
附录 B 变速驱动时感应电动机参数辨识算法仿真程序.....	299
参考文献.....	304

第1章 绪 论

1.1 自适应控制的任務

“适应”和“控制”这两个词几乎同样古老。如果粗略地将“自适应”定义为对环境变化的自我调整能力，就不可能将反馈控制排除在外。反馈控制的两项基本功能，其一是用系统输入和输出的差，按照一定的调节算法决定控制量；其二是使得控制系统的性能对被控对象和环境的变化表现出一定的鲁棒性。实际上，主要建立在频域分析方法之上的控制系统的经典设计方法之所以经久不衰的原因，正是因为它能够赋予控制系统在性能和鲁棒性上的某种和谐和统一。

然而，鲁棒性和自适应是有区别的。鲁棒性设计所要解决的问题是，如何设计控制器参数，以使控制系统的性能对于被控对象参数在其设计值的某一邻域内的变化变得不敏感。而自适应控制所要解决的问题是，当被控对象参数发生大范围变化时，控制器如何自动地改变其自身参数，以使控制系统的性能维持不变。

从原理上说，控制系统的经典设计方法无法解决系统的适应性控制问题，它所具有的魅力是有条件的。由于控制任务的复杂性和多样化，按偏差进行调节的控制策略的有效性也是有限的，这主要表现在：

(1) 只有被控对象的参数可以准确地测知，控制系统的经典设计方法才既简单又有效。例如，对于无零点的被控对象，可以通过将串联调节器的零点布置在被控对象的特性不好但稳定的极点附近，从而控制系统的性能实际上由串联调节器的极点和反馈调节器来决定。如果被控对象的参数发生变化，则只有当这种变化比较小，使这种零、极点之间的相消或近似相消得以继续

实现时，控制系统的性能才能得到保证。

(2) 当被控对象的参数只能大概把握，或会随环境发生较大变化时，可以通过增大控制回路的增益的方法，使得控制系统的性能对这种变化不敏感。因为，只要增益足够大，则除去趋向于无限远的闭环极点外，其余闭环极点都趋向于系统的零点，并试图与其相消，这一性质并不会因对象参数的变化而改变，控制系统总是试图使输出复现参考输入。但这样设计的调节器，因增益大而使系统的稳定性设计变得困难，控制作用一般是生硬和死板的，控制目标的完成常以较大的能量损耗为代价。在实际系统中，控制量的幅度是受限制的，过分增大增益常常是不现实的。

(3) 被控量必须是可测的，测量装置应该满足一定的精度要求，任何出现在反馈通路的偏差和干扰都将破坏控制系统的性能，且控制系统对此没有丝毫适应能力。若被控量不是直接可测的，则应设置观测器，而观测结果的准确性依赖于观测器的设计方法和对被控对象参数的准确把握。这时，观测器的适应性设计甚至比控制器的适应性设计更重要，因为在错误的观测条件下，再好的控制也只能适得其反。

(4) 观测器的自适应设计的重要性还体现在，有些控制系统的控制策略依赖于系统不直接可测的内部状态，交流传动矢量控制系统的自适应设计问题在这方面具有代表性。还有一些控制系统，其控制目标是使某一性能指标达到最优，它的控制策略依赖于对象的参数或状态，而并非仅仅依赖于输入和输出量的偏差，按偏差调节的控制策略在这里失效了。

(5) 控制器的设计方法对输入信号的形式有依赖性，这种依赖性使得人们在设计控制系统时，总是希望提高系统的无差度，但这和控制系统的稳定性要求是相矛盾的。

(6) 当工艺的变化要求控制参数也做相应改变时，则这种改变必须事先做好，控制算法不可能自动地完成这种改变。

然而，环境对过程的影响和过程本身特性的变化是必然的，其中一些变化还是大范围的。例如，电动机轴上的机械惯量的变

化, 电流断续条件下系统放大倍数的变化, 交流电动机转子时间常数的变化, 空间飞行器的空气动力学参数随飞行高度、飞行速度和大气条件的变化, 船舶的动态特性随水域和吃水深度的变化, 航天飞行器的质量和重心随燃料消耗的变化, 等等。对于如此众多的具有较强不定性的受控系统, 如何设计一个满意的、具有某种适应能力的控制器或观测器, 便是自适应控制所要解决的问题。

自适应控制系统的形式是多样的, 新的形式和设计方法还在不断地被发现。然而, 本书所涉及的自适应的方法是有限的, 不可能做到一概而全, 本书的自适应方法至少具有以下几个方面的特征:

(1) 首先被控对象的参数是全部或部分未知的, 被控对象的结构信息, 如阶数、延迟拍数等, 或者要求是已知的, 或者只知道其估计值; 如果被控对象的参数不仅未知而且是时变的, 则要求和自适应算法的收敛速度相比较, 被控对象参数的变化相对来说是慢的; 如果被控对象的参数发生快速变化, 则要求这种变化相对于系统的控制周期来说不是频繁的, 即被控对象可以看成是定常的; 一般来说, 只有被控对象的输入和输出信号以及它们的滤波信号才可以利用。

(2) 其次是对自适应机构的要求。自适应控制器和自适应观测器一般是结构固定和参数可调的; 控制器中一般不能使用测量量的微分信号, 尤其不能使用输出量 (其中含有测量噪声) 的微分信号。在某些情况下, 参考输入信号的微分是可以考虑的; 控制器必须是可以物理实现的或必须是因果的, 控制律最好是已知量的线性函数。

(3) 最后是对自适应算法的要求。自适应算法应有全局稳定性的证明, 或者系统的稳定性是有充分保证的, 自适应算法的收敛速度应该足够快; 对对象的结构偏差和未建模动态有一定的鲁棒性。当检测信号被噪声污染时, 算法的性能有一个好的评价; 算法中只允许包含被控对象的输入和输出以及它们的滤波信

号，不允许有纯微分运算。

不难看出，自适应控制任务的完成，远比一般的控制问题要复杂和困难得多。如果说，经典控制系统是按照既定方案进行工作的，那么自适应控制则要完成寻找控制方案以及实现控制的双重任务。

1.2 自适应控制系统的类型

因为设计原理和实现结构的不同，自适应控制系统主要有以下几种形式：

1. 增益自调度系统 如果系统的某个变化因素的变化规律人们可以事先把握，则依据这些先验知识设计出的控制系统，对这个变化因素的适应能力可以做得很好，而且设计方法是简单实用的，并不需要更多的新的理论来支持。一个简单的例子是在晶闸管调速系统中，晶闸管放大环节因控制角不同和电流断续而引起的放大倍数所呈现的非线性变化，在某些情况下（如系统的低速运行）将严重影响系统的性能，解决的办法是通过在移相环节中引入一个非线性补偿环节和根据主回路电流断续情况适当改变调节器的参数。

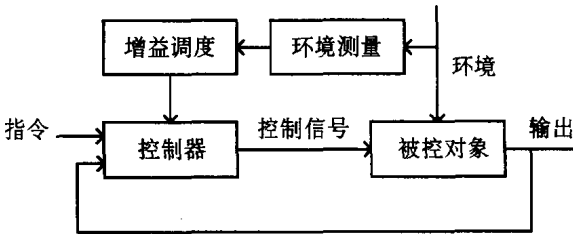


图 1-1 增益自调度系统

一般来说，根据环境和工况的变化适当修改控制策略，即图 1-1 所示的增益自调度系统的设计方案，原则上是可行的。不过当环境变化因素较多，对控制系统影响的规律比较复杂时，这样做的难度很大，有效性也就成了问题。另外，这种适应方式本质