

前 言

1981年,原第一机械工业部为贯彻、落实《中共中央、国务院关于加强职工教育工作的决定》,确定对机械工业系统的技术工人按照初、中、高三个阶段进行技术培训。为此,组织制定了30个通用技术工种的《工人初、中级技术理论教学计划、教学大纲(试行)》,编写了相应的教材,有力地推动了“六五”期间机械行业的工人培训工作,初步改变了十年动乱造成的工人队伍文化技术水平低下的状况,取得了比较显著的成绩。

鉴于原机械工业部1985年对《工人技术等级标准(通用部分)》进行了全面修订,原教学计划、教学大纲已不适应新《标准》的要求,而且缺少高级部分;编写的教材,由于时间仓促、经验不足,在内容上存在着偏深、偏多、偏难等脱离实际的问题。为此,原机械工业部根据新《标准》,重新制定了33个通用技术工种的《机械工人技术理论培训计划、培训大纲》(初、中、高级),于1987年3月由国家机械工业委员会颁发,并根据培训计划、大纲的要求,编写了配套教材149种。

这套新教材的编写,体现了《国家教育委员会关于改革和发展成人教育的决定》中对“技术工人要按岗位要求开展技术等级培训”的有关精神,坚持了文化课为技术基础课服务,技术基础课为专业课服务,专业课为提高操作技能和分析解决生产实际问题的能力服务的原则。在内容上,力求以

IV

基本概念和原理为主，突出针对性和实用性，着重讲授基本知识，注重能力的培养，并从当前机械行业工人队伍素质的实际情况出发，努力做到理论联系实际，通俗易懂，具有工人培训教材的特色，同时注意了初、中、高三级之间合理的衔接，便于在职技术工人学习运用。

这套教材是国家机械工业委员会委托上海、江苏、四川、沈阳等地机械工业管理部门和上海材料研究所、湘潭电机厂，长春第一汽车制造厂、济南第二机床厂等单位，组织了 200 多个企业、院校和科研单位的近千名从事职工教育的同志、工程技术人员、教师、科技工作者及富有生产经验的老工人，在调查研究和认真汲取“六五”期间工人教材建设工作经验教训的基础上编写的。在新教材行将出版之际，谨向为此付出艰辛劳动的全体编、审人员，各地的组织领导者，以及积极支持教材编审出版并予以通力合作的各有关单位和机械工业出版社致以深切的谢意！

编好、出好这套教材不容易；教好、学好这些课程更需要广大职教工作者和技术工人的奋发努力。新教材仍难免存在某些缺点和错误，我们恳切地希望同志们在教和学的过程中发现问题，及时提出批评和指正，以便再版时修订，使其更完善，更好地发挥为振兴机械工业服务的作用。

国家机械工业委员会
技工培训教材编审组

1987年11月

目 录

前言

第一章 自动控制原理的基本概念	1
第一节 开环与闭环控制系统	1
第二节 自动控制系统的分类	4
第三节 自动控制系统的品质指标与控制器	5
第四节 多环控制系统	15
复习题	17
第二章 晶闸管一直流电动机可逆调速系统	18
第一节 概述	18
第二节 晶闸管可逆电路的配合控制与环流	21
第三节 逻辑无环流可逆调速系统	33
第四节 晶闸管一直流电动机可逆调速系统实例—— B2016型龙门刨床主拖动系统	53
第五节 设备的检查、调试与故障分析	76
复习题	95
第三章 晶闸管斩波器	97
第一节 概述	97
第二节 晶闸管斩波器的工作原理	99
第三节 晶闸管斩波器应用实例——QKT-27司机控制器	110
第四节 设备的检查、调试与故障分析	121
复习题	127
第四章 晶闸管变频装置	129
第一节 概述	129
第二节 并联谐振式逆变器	131

VI

第三节	串联谐振式逆变器	146
第四节	串联逆变器与并联逆变器的比较	155
第五节	晶闸管变频装置实例——KGPS100-1 晶闸管中 频电源装置	157
第六节	设备的安装、检查、调试与故障分析	173
复习题		191
第五章	高频电源	193
第一节	概述	193
第二节	闸流管高压整流电路	194
第三节	晶闸管交流调压整流电路	203
第四节	高频电源中的电子管振荡器	211
第五节	高频电源装置实例之一——GP-100C3型高频 设备	229
第六节	GP-100C3高频设备的安装、检查、调试与故障 分析	240
第七节	高频电源装置实例之二——GP30-B型高频 设备	259
第八节	GP30-B高频设备的检查试验	266
复习题		269

第一章 自动控制原理的基本概念

现代工矿企业生产中，大量使用各种各样的机器设备。为了提高产品质量，降低生产成本，提高劳动生产率，把工人从繁重的体力劳动和重复的手工劳动中解放出来，这些机器设备广泛采用了自动控制技术。“自动控制”已经成了与现代机器制造业紧密相联的一个重要技术内容。因此，在详细讨论具体的工厂电气设备之前，我们必须对控制系统有一个基本的了解。

第一节 开环与闭环控制系统

一、开环控制系统

现代工业生产中，已经不能单纯依赖于人力操作。各种机械的、电动的、气动的、液压的装置广泛地应用于实际生产中的各种操作。如果这种操作的控制过程已事先进行了校准，外界干扰因素对校准值的影响在预计之内，并且对工作过程没有明显



图1-1 开环控制框图

的影响，那么，这种操作就可以按照图 1-1 的框图来实现。

在这种控制过程中，系统的输出量对其输入控制没有影响，我们称之为开环控制。实现这种控制的系统就叫开环控制系统。

例如，普通车床的车削过程中，对其转速的控制就属于

开环控制。如果将齿轮箱手柄扳到不同位置，车床就有不同的转速。在这里，手柄位置是输入量，齿轮箱是控制器，车床主轴是控制对象，车床转速是输出量。一旦我们根据加工工艺要求，给定了转速控制的输入量（即扳好了手柄），被控制的输出量（车床转速）就已确定。加工过程中虽然车床转速会因为电源电压波动、负载变化等原因而偏离预先的校准值，但这个偏离在我们的预计之内，对生产过程没有明显的影响，该控制过程的输出量不影响输入量的控制作用。

开环控制通常是一种简单、经济的控制方式。

二、闭环控制系统

在另外许多控制过程中，或者是由于各种不可预测的外界因素的影响，使控制关系不可能事先校准好，或者是由于控制精度的要求，必须随时按照输出量的变化来修改控制作用，使系统的输出量紧紧地跟随输入的给定值，那么，这种操作就可以按照图 1-2 的框图来实现。

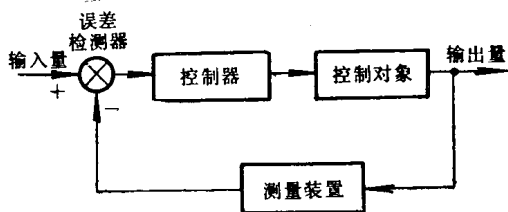


图1-2 闭环控制框图

在这类控制中，我们首先把输入的给定值与测量得到的输出实际值放到误差检测器里进行比较，得到它们的差值。控制器根据这个差值随时修改对控制对象的控制。这时，系统的输出量对控制作用有直接影响。这种控制方式叫闭环控制，实现闭环控制的系统叫闭环控制系统。

有时候，对输出量的观测和对控制作用的修改是由人来的，这叫人工闭环控制系统。

驾驶员驾驶汽车就是人工闭环控制。在这个控制过程中，输入量是驾驶员所希望的车速，输出量是实际车速，驾驶员的眼睛是测量装置，大脑是误差检测器，手脚是控制器，汽车是控制对象。大脑将眼睛所观测到的实际车速与所希望的车速加以比较，并随时通过手脚的作用纠正汽车的速度，使之保持所希望的速度。

但是，现代技术常常对系统的控制精度和快速反应提出很高的要求。在复杂的控制系统中，各变量之间存在着错综复杂的关系，人工是不能完成这样的控制的，必须采用自动控制设备来代替人工操作。这样，就出现了自动控制系统。

图 1-2 所示的框图中，闭环对输出量误差的调整是这样进行的：首先，将系统的输入-输出关系校准好，在稳定工作时，输出量按确定的关系受输入量控制。如果，由于外界干扰，输出量发生了变化，例如，降低了一个 Δ 值，这个降低立即被测量装置反馈到误差检测器里，误差检测器将输入量与反馈量之差送到控制器，控制器根据这个差值对控制对象产生作用，使输出量恢复到输入量所确定的数值。在误差检测器里，反馈量是以与输入量符号相反的形式出现的，是负反馈性质。误差检测器送给控制器的信号是给定量与反馈量之差。

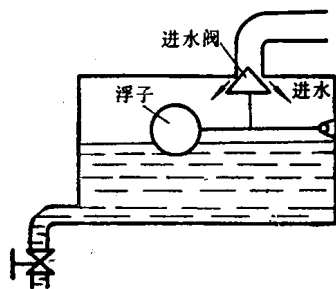


图 1-3 液面控制器

图 1-3 是一个最简单的液面自动控制系统的例子。为了保证供水正常，水箱里的液面应保持一定高度。在稳定工作时，进水量与出水量相等，液面高度一定。如果由于外界因素影响，例如，用户用水量增

加,使水箱液面下降,这个降低立即为浮子所反映。浮子位置的下降值,即为液面实际高度与给定高度之差。浮子下降,阀门开度增大,进水量增多,水箱内液面回升。在这个调节过程中,浮子是测量装置,进水阀是控制器,联接浮子与阀门的杠杆装置是误差检测器,控制对象为水箱内的水。

第二节 自动控制系统的分类

自动控制系统可以从一些不同的角度来进行分类。

一、按给定值变化规律分类

1. 定值调节系统 自动保持被控制量为恒定值的控制系统,叫定值调节系统。例如,恒速调节系统、恒压调节系统等等。

2. 程序控制系统 使被控制量按一定的、事先确定好了的规律进行变化的控制系统叫做程序控制系统。例如,加热炉的温度控制,炉温就是按预先确定的程序进行控制的。

3. 随动系统 输入量的变化规律事先不能确定,使输出量跟踪于给定值在广大范围内随意变化的控制系统叫做随动系统。例如,雷达对高射炮方位角的控制,坦克手对坦克炮塔旋转的控制等等,就属于这种性质的系统。

二、按调节作用与时间的关系分类

1. 连续调节系统 在这种系统中,被调量与给定量之间的联系不会中断。例如,电机扩大机自动调节系统,晶闸管一直流电动机调速系统都是连续调节系统。

2. 离散调节系统 又称采样调节系统。这种系统中,控制所需要的测量是以间断的方式进行的,电子计算机控制系统就属于这一类系统。

三、按被调量与给定量有无静态误差来分类

1. 有差调节系统 这种系统中, 在干扰作用下, 系统稳定后被调量与给定值的误差(静态误差)是不可避免的。因为调节作用就是靠这种误差产生的。如果没有这种误差, 也就没有调节作用了。

2. 无差调节系统 在这种系统中, 当稳定时被调量与给定值之间不存在误差, 只有被调量与给定值相等时, 调节器才停止对调节对象的调节作用。

另外, 还可以根据不同的反馈方式、系统的复杂程度等等进行分类, 这些在谈到具体的控制系统时再一一进行讨论。

第三节 自动控制系统的品质指标与控制器

一、自动控制系统的品质指标

生产工艺对自动控制系统的控制过程是有一定要求的, 这些要求以品质指标的形式提出。自动控制系统的品质指标包括静特性指标和过渡过程指标。

1. 静特性指标 自动控制系统的静特性是指在稳定工作状态时, 系统的被控制量与外界干扰(扰动)的关系, 即扰动存在时, 系统被控制量的稳态值与给定值之间的误差关系。静特性指标也就是静态误差指标, 它用被控制量在扰动作用下偏离给定值的最大允许误差来表征。控制精度要求越高的系统, 其静态误差指标越小。

2. 过渡过程指标 自动控制系统在控制或扰动的作用下, 会由一个稳态过渡到另一个稳态, 这个过程, 叫做自动控制系统的过渡过程。对这个过程的品质要求, 我们用过渡过程指标来表征。它包括有两个方面的含义: 系统的稳定性

和系统的动态品质指标。

(1) 系统的稳定性 首先, 系统的过渡过程必须是稳定的。也就是说, 系统必须单调或者减幅振荡地从一个稳态达到另一个稳态, 不允许进入到增幅或者等幅振荡状态。如果发生了后面的情况, 系统就是不稳定的, 这意味着系统无法正常工作, 这种系统叫做不稳定系统。

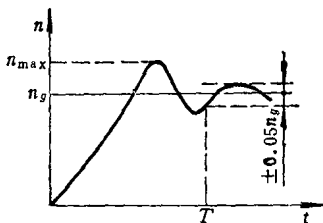


图1-4 过渡过程曲线

(2) 系统的动态品质指标 系统仅仅满足了稳定性要求是不够的, 生产工艺对过渡过程还提出了动态品质指标的要求。图 1-4 就是一个典型的控制系统的过渡过程。当输入给定量发生突变时, 被控制的输出量 n 以减幅振荡的形式从原来的稳定状态 (相应于图中的原点) 过渡到新的稳态 n_s 。

与图 1-4 所对应的动态品质指标是:

1) 最大超调量 $\sigma\%$: 它由下面公式定义

$$\sigma\% = \frac{n_{\max} - n_s}{n_s} \times 100\%$$

超调量太大, 达不到工艺上的要求, 但限制得太小, 又会使过渡过程过于缓慢, 一般要求 $\sigma\% = 10 \sim 35\%$ 。

2) 过渡过程时间 T : 从控制或者扰动作用于系统开始到被控制量 n 进入到 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 稳定值区间为止的一段时间叫做过渡过程时间, 又叫做调整时间。不同的控制系统对此有不同的要求。

3) 振荡次数: 过渡过程时间内, 被控制量 n 在其稳定

值 n_s 上下振荡的次数叫振荡次数。图 1-4 所示的过程，其振荡次数为一次。不同的生产机械对振荡次数的要求是不一样的。例如，龙门刨床、轧钢机一般允许有一次振荡，而造纸机却要求平稳的过渡过程，不允许有振荡发生。

二、控制器

为了同时满足生产工艺对自动控制系统静特性指标和动态品质指标的要求，实际控制过程中，控制器要把从误差检测器获得的误差信号经过一定的处理，再用来作用于被控制的对象上。不同的控制器，对误差信号的处理方式不同，控制系统所得到的品质指标也不同。下面，就对工业自动控制系统中常用的几种控制器及其特性逐一进行介绍。

1. 比例控制器（P 控制器） 当控制器直接把从误差检测器所取得的误差信号按比例放大来进行控制时，这样的控制器叫做比例控制器（P 控制器）。图 1-5 是采用比例控制器的自动控制系统框图。

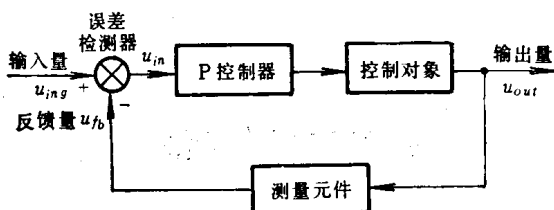


图1-5 带 P 控制器的自动控制系统框图

目前在各种电气自动控制系统中广泛采用线性集成运算放大器作比例控制器，其原理图如图 1-6 所示。

根据晶体管电路知识可知，比例控制器实际上就是一个带深度负反馈的直流放大器，它的比例系数（即放大倍数）

$K = -\frac{R_1}{R_0}$ ，式中的负号说明这个放大器具有反相放大的特

性。也就是说，当输入电压 u_{in} 为正值时，输出 u_{out} 为负值；当 u_{in} 为负值时， u_{out} 为正值。

我们已经知道，建立闭环控制系统的目的在于系统受到外界各种干扰而输出量偏离了给定值时，系统的误差检测器能检测出这种偏差并输往控制

器，控制器作出相应的反应，作用于控制对象，自动调节输出量，使输出量克服干扰的影响而紧紧地跟随给定值。那么，采用 P 控制器的闭环系统

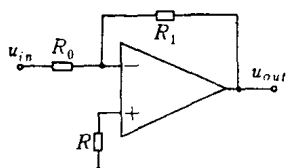


图 1-6 P 控制器原理图

对外界干扰的反应究竟如何？控制器的比例系数对这种自动调节作用又有何影响呢？我们针对图 1-5 的框图作一简单的分析。

P 控制器对控制对象的作用是由误差检测器送来的误差信号进行控制的，且输出与输入成正比。当 P 控制器放大倍数很大时，很小的输入误差就会产生很大的修正控制作用，使控制对象的输出回到原来的给定数值。

然而，这种系统只能随着控制器比例系数的增加尽量减少输出误差，提高系统的控制精度，而不能消除这个误差。因为控制器对控制对象的修正控制作用是根据输出存在误差而产生的，它们是正比关系。如果输出没有误差，也就没有控制的校正作用了。所以这种系统属于有差调节系统。

可以证明，不论干扰信号是以什么方式从闭环中哪一个环节加入，与开环控制系统相比，它对输出量的影响都会被闭环系统的调节作用减少到一定的程度。

从减少误差的角度来看，控制器的放大倍数越大越好。实际上，这个放大倍数是有一定限制的。放大倍数过大会影

响系统动态品质，可能造成系统的不稳定。为此，我们要对图 1-5 的框图作进一步的分析。

控制系统各个环节的具体结构是不同的。它们可能是电气装置，也可能是液压装置、机械装置等等。无论这些环节的工作原理、实际构造如何，它们都不可避免地存在惯性，每个元件对输入信号的响应总会有一定的延迟。当输入信号频率很低时，因惯性产生的输出信号对输入信号的相位延迟可以忽略，反馈到误差检测器的信号 u_{fb} 与输入量 u_{ng} 相位相反，系统属于负反馈性质。随着信号频率的增高，惯性一方面使输出信号幅度逐渐降低，同时使相位滞后逐渐增大。若对某个频率为 f_0 的信号，系统各个环节对它产生的总相位移达到 180° ，那么此时 u_{fb} 与 u_{ng} 的相位相同，该系统对于这个频率信号的反馈实际上成了正反馈，加到控制器输入端的信号 u_{in} 是 u_{ng} 与 u_{fb} 相加的结果。假如控制器放大倍数太大，那么，即使没有输入信号 u_{ng} ，任何频率为 f_0 的干扰信号都能通过闭环的反馈作用维持系统以 f_0 的频率持续振荡，造成了系统的不稳定。

综上所述，我们可小结如下：比例控制器构成的闭环系统是有差调节系统。它能降低干扰信号对系统的影响。增大比例控制器的比例系数 K ，可以减小系统的输出误差，增加系统的调节精度。但 K 值过大，又可能造成系统的不稳定。因此， K 值的选择要兼顾系统的精度与动态稳定性两方面的要求。

在能既保证系统稳定性，又能满足生产工艺对调节精度的要求时，比例控制器是一种常用的控制器。

2. 积分控制器（I 控制器）带比例控制器的闭环系统能减小外界干扰所产生的静态误差，但不能消除静态误差，

若要达到很高的调节精度，必须增大控制器的放大倍数，但这又常常导致系统的不稳定。为了解决系统静态误差和动态稳定性的矛盾，积分控制器的工作特性引起了人们的注意。

积分控制器的输出信号不是与输入的误差信号成正比，而是与输入信号对时间的积分成正比。也就是说，输出信号等于误差信号对时间的积累。尽管误差信号很小，它随时间的积累会越来越大，控制器就会产生一个可观的纠偏控制信号来调节系统的输出。只要误差存在，控制器的调节作用就不会停止，最终会使系统的静态误差减小到零。这样就构成了无差调节系统。其框图如图 1-7 所示。

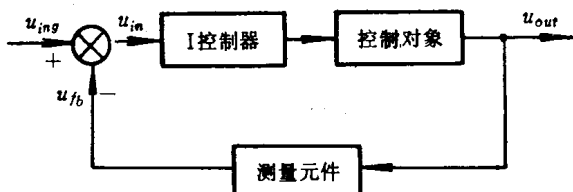


图1-7 带 I 控制器的自动控制系统框图

由运算放大器构成的积分控制器原理图如图 1-8 a 所示，图 1-8 b 画出了在 $t = 0$ 的时刻向该控制器输入一个阶跃信号

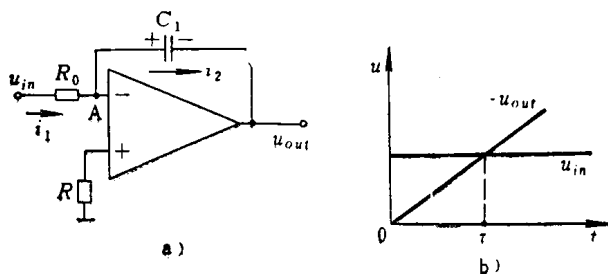


图1-8 I 控制器

a) I 控制器原理图 b) I 控制器对阶跃输入的响应

号 u_{in} 时, 其输出电压 u_{out} 的变化曲线。

积分控制器对输入信号 u_{in} 的积分作用是这样产生的: $t = 0$ 时, 有阶跃输入 u_{in} 加到放大器的输入端, 根据晶体管电路的知识可知, A 点是“虚地”点, 故有电流 $i = \frac{u_{in}}{R_0}$ 产生, 流向运算放大器。因为 A 点电位几乎为零, 运算放大器输入电阻又很高, 故从 A 点流入运算放大器的电流极少, 可以忽略不计, 于是电容 C_1 支路的电流 i_2 可以看成与 i_1 相等。电流 i_2 向电容 C_1 充电的结果, 使电容 C_1 两端堆积的电荷越来越多, 电压也越来越高。注意到 A 点电位几乎为零, 电容正电荷端接 A 点, 故输出电压 u_{out} 为负, 且随着时间的积累其绝对值越来越大。由此可见, 此积分控制器具有反相积分的特性, 即输入信号 u_{in} 为正时, 积分后输出的电压 u_{out} 为负。为了便于比较, 图 1-8 b 所示的为 $-u_{out}$ 的曲线。

在自动控制系统中, u_{in} 是从误差检测器送来的误差信号, u_{out} 是控制器送出的纠偏控制信号。只要系统输出量与给定值之间存在误差 u_{in} , 不论它多么小, 随着时间增长, 误差不停地积累, 控制器输出的纠偏信号 u_{out} 越来越大, 最终会完全消除系统的输出误差。

图 1-8 b 清楚地显示了 I 控制器对阶跃输入信号的积分过程。从图中的 $-u_{out}$ 曲线可以看出, 虽然 I 控制器能使闭环系统做到没有静态误差, 但输出对输入的响应往往显得太慢了。 $-u_{out}$ 的逐渐增长说明控制效果是逐渐反映出来的, 这样有时满足不了对系统提出的快速响应的动态品质要求。

比例控制器调节过程中虽然存在着静态误差, 但动态响应却很迅速, 只要输出量产生了误差, 控制器立即有一个与误差成比例的控制作用输出, 并进行调节。在要求系统既具

有较快速的动态响应, 又没有静态误差时, 只要把比例控制器和积分控制器结合起来就行了, 这就是比例-积分控制器。

3. 比例-积分控制器 (PI 控制器) 我们知道, 用线性集成运算放大器是很容易实现比例-积分控制的。图 1-9 a 就是一个这样的控制器。图 1-9 b 画出了 $t = 0$ 且向该放大器输入一个阶跃信号 u_{in} 时其输出电压 $-u_{out}$ 的变化曲线。

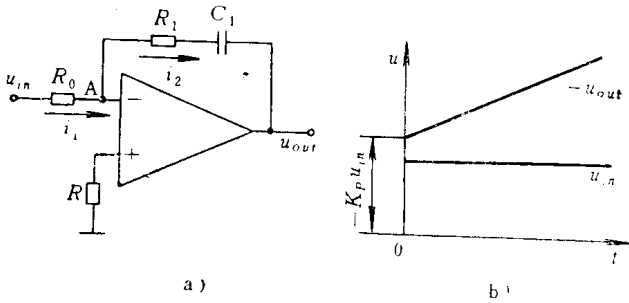


图1-9 PI控制器

a) PI 控制器原理图 b) PI 控制器对阶跃输入的响应

由图 1-9 b 可见, 比例-积分控制器的输出由“比例”和“积分”两部分组成。当突加 u_{in} 时, 开始瞬间 C_1 相当于短路, 反馈电路中只有电阻 R_1 起作用, 控制器相当于放大倍数为 $K_P = -\frac{R_1}{R_0}$ 的比例控制器, 输出端上立即出现大小为 $K_P \cdot u_{in}$ 的电压, 马上进行调节。此后, 随着 C_1 被充电, 开始了积分过程, $-u_{out}$ 的数值线性增长, 使系统最终消除静态误差。 u_{out} 所带的负号是因为该运算放大器是反相放大。

用比例-积分控制器构成闭环系统, 既能获得无静态误差特性, 又具有较快的动态响应, 因而得到了广泛的应用。

比例-积分控制器最终会消除系统的静态误差, 因此对

其参数的考虑主要是系统的动态品质。当控制对象具有很大惯性时，为了加快动态响应，必然要增加比例-积分控制器的比例输出部分，可是，如前所述，比例系数太大，一方面可能会引起系统不稳定，另一方面也可能会因为控制对象具有很大的惯性而产生过大的超调量，形成过多的振荡次数。为了解决这个矛盾，人们在比例-积分控制器的基础上再增加一个对误差信号的“微分”部分，以反映误差信号的变化速度，这样，就构成了比例-积分-微分控制器。

4. 比例-积分-微分控制器（PID 控制器）把微分控制作用加进控制器里以后，我们就可以得到一个具有高灵敏度的控制器，它对误差信号的变化速度也作出了相应的响应。在误差信号开始产生的一瞬间，也就是输出量开始偏离给定值的一瞬间，控制器就在误差变得太大之前产生了一个有效的提前校正作用，使系统快速响应。当系统输出量在调节作用下向给定值接近时，控制器的微分部分又能给出一个相反的控制信号，提前产生制止控制对象因惯性而产生超调的作用，增加了系统的阻尼效果。微分控制信号的加入改善了系统的动态品质。

由于微分作用对快速变化的噪声信号（如测速发电机电压中的噪声电压等）很敏感，应当在 PID 控制器输入端设置滤波器，用以消除高频

噪声电压的干扰。由集成运算放大器所组成的 PID 控制器原理图如图 1-10 所示。

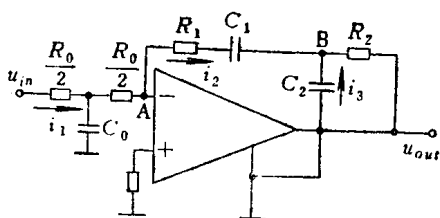


图1-10 输入端有滤波器的 PID 控制器