

960302

TP214
1044

高等纺织院校教材

电动调节器 原理及系统分析

纺织工业出版社

高等纺织院校教材

电动调节器原理及系统分析

王士杰 编著

王家桢 审

纺织工业出版社

高等纺织院校教材
电动调节器原理及系统分析

王士杰 编著

王家桢 审

*

纺织工业出版社出版

(北京东直门海大街4号)

纺织工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

850×1166 毫米 1/32 印张: 9 8/32 编页: 1 字数: 236千字

1992年12月 第一版第一次印刷

印数: 1—3,000 定价: 2.90元

ISBN 7-5064-0710-X/TP·0002

前 言

本书是在中国纺织大学生生产过程自动化专业《调节仪表》课程的补充讲义《电动PID调节原理》(1987年第二版本)及作者在模拟调节仪表和系统方面所发表的部分论文的基础上,修改补充而成。共四章,各章的主要内容和特点如下:

第一章简单扼要地讨论了PID调节器的调节规律、实际PID调节器的参数、调节器的静态特性和频率特性等基本问题。

第二章以DDZ-II系列仪表DTL-321型PID调节器为例,对PID调节器从物理概念、电路原理、静态和动态特性、手动-自动切换等方面作了比较深入的剖析。DTL-321型调节器与目前国内广泛使用的其他PID调节器,如DDZ-III系列的PID调节器,I系列和EK系列仪表的PID调节器,SPEC200以及组装仪表的PID调节单元等,其PID调节规律的共性是一致的。在电路构成方面,这些PID调节器(包括DTL-321)也有很多类似之处。目前国内书刊对各种PID调节器的讨论,大多停留在电路介绍和其传递函数的推导上,而对其工作的物理过程,各种状态的静、动态特性,调校和使用过程中所出现的问题,往往讨论得不够确切和具体。学生在学习《调节仪表》课程后,在仪表制造、调校和使用过程中遇到问题时,尚不能从理论上予以说明并妥善地解决。作者选择DTL-321调节器作为讨论的重点,这是因为其功能已比较完善,同时由于其放大器的特殊性,使得这种调节器的分析,要比DDZ-III系列PID调节器复杂。掌握了关于DTL-321的分析方法,即可方便地分析其他PID调节器。因此,解剖DTL-321调节器具有举一反三的作用。

第三章所讨论的是PID调节器与典型过程[如 $K \cdot e^{-\tau s} / (\tau s + 1)$]

340

1) 等) 所组成的系统的一些特殊的、重要的实际问题。这些问题在《过程控制系统》课程中往往被忽视而未作应有的分析。例如系统的积分饱和问题, 本书从其形成机理、所引起的超调量的定量分析、影响因素、避免方法作了系统的解剖。又如微分先行问题, 本书讨论了两种微分先行对抗积分饱和的机理的共性以及对系统有小给定扰动时的区别。在“控制系统手动-自动切换的分析”一节里, 讨论了两种切换方式在手动到自动过程中的实质性区别。同时在 I-PD 调节器、积分反馈限幅的 PID 调节器以及间歇单元等节里, 不仅讨论了它们的抗积分饱和的机理, 也讨论了它们之间的内在联系和区别。这些内容, 对调节器的研制和使用都具有一定的指导意义。该章第八节所讨论的系统的频率特性分析, 从物理概念上讨论了调节器的比例增益、积分时间和微分时间对系统的过渡过程以及控制品质的影响。尽管这部分内容比较基本, 然而对于读者正确地掌握 PID 控制的要领是十分必要的。该章第九节, 除了介绍一些国外比较新型和有效的参数整定方法(如 Lopez Rovira 方法和 Fertik 方法)外, 还介绍了本书作者及其同事们所提出的“考虑积分增益 K_I 、微分增益 K_D 和相互干扰系数 F 的按积分准则的整定方法”和“基于衰减频率特性, 保证一定衰减度并使偏差积分准则为最小的整定方法”。本书不仅介绍了此两种计算方法及参数整定以供现场整定时使用, 同时也定量地说明了对象的参数对控制性能的影响, 这是其他资料中所不多见的。

第四章讨论了断续式调节器及其系统分析。主要讨论二位式、时间比例(二位比例微分)、二位PID以及三位PI调节规律的特点, 这些调节仪表的构成方法, 与典型对象所组成的系统分析及参数整定等。本章内容是作者在系统地研究了动圈XCT型和TA系列电子调节仪中有关仪表后, 从理论上对这些调节规律所进行的概括和总结。

本书附录I中介绍了作者所提出的一种独特的分析调节器传

递函数的方法，有一定的实用性，附录Ⅱ中所介绍的对象特性的闭环测试方法，亦具有其测试精度高、速度快等较高的实用价值。

本书力求用控制理论和电子技术严密、细致地分析研究电动调节器和控制系统，限于篇幅公式推导比较简略。

本书经清华大学自动化系王家桢教授审阅，并提出宝贵意见，仅在此表示衷心感谢。

编著者

(京) 新登字037号

内 容 提 要

本书对电动PID调节器的构成原理, 静态、瞬态和动态特性作了细致的分析, 突出物理概念, 并讨论了影响调节器性能的因素。在此基础上, 对PID调节器与典型过程组成系统的控制点偏差、积分饱和、手动-自动切换、微分先行、I-PD控制、积分反馈限幅、间歇单元、频率特性、参数整定等问题都作了相当深入的定量研究。本书还对各种断续式的模拟调节器(二位、时间比例、二位PID、三位PI)的结构和系统作了比较深入和系统的讨论。本书可作大专院校自动化专业和仪表专业的师生教学用书, 并可供有关工程技术人员参考。

特约编辑: 李绍义

责任编辑: 郑剑秋

目 录

第一章 电动PID调节器的一般问题	(1)
第一节 调节器的调节规律.....	(1)
第二节 实际PID调节器的参数.....	(7)
第三节 调节器的静态特性.....	(13)
第四节 PID调节器的频率特性.....	(17)
第二章 DTL-321型PID调节器	(23)
第一节 概述.....	(23)
第二节 调节器的控制点和开环放大倍数的调整 方法.....	(27)
第三节 调节器在纯比例状态下的特性.....	(31)
第四节 调节器在比例积分状态下的特性.....	(34)
第五节 调节器在比例微分状态下的特性.....	(40)
第六节 调节器在比例积分微分状态下的特性.....	(46)
第七节 控制点偏差和积分电容漏电对它的影响.....	(60)
第八节 电容漏电对调节器参数的影响.....	(63)
第九节 调节器在手动状态的分析.....	(65)
第十节 DTL-321调节器的电路.....	(70)
第十一节 调节器调校过程中的主要问题.....	(80)
第三章 调节器与被控过程所组成的系统分析	(89)
第一节 系统的静态特性.....	(89)
第二节 积分饱和现象及其对系统控制质量的影响.....	(92)
第三节 控制系统手动-自动切换的分析.....	(102)
第四节 微分先行式PID调节器及其在系统 抗积分饱和中的作用.....	(109)

第五节	I PD调节器及其在系统抗积分饱和中的作用.....	(121)
第六节	积分反馈型限幅电路及其在抗积分饱和中的作用.....	(126)
第七节	间歇单元的抗积分饱和功能.....	(135)
第八节	调节器参数整定的Ziegler-Nichols法.....	(138)
第九节	PID调节器的各种参数整定方法.....	(156)
第四章	断续式调节器及其系统分析.....	(179)
第一节	二位式调节器及其系统分析.....	(179)
第二节	时间比例调节器及其系统分析.....	(206)
第三节	二位PID调节器及其系统分析.....	(226)
第四节	三位PI调节器的调节规律.....	(257)
附录 I	由运算放大器组成的 PI、PD以及PID 调节器 传递函数的分析方法.....	(267)
附录 II	对象特性的闭环测试方法.....	(279)
主要参考文献		(286)

第一章 电动PID调节器的一般问题

第一节 调节器的调节规律

在自动控制系统中,为了改善系统的各项品质指标,常采用超前型、滞后型、超前-滞后型校正网络。对于被控参数为温度、压力等的工业过程,由于这些过程的动特性常可用 $Ke^{-\theta s}/(\tau_1 S + 1)$ 、 $Ke^{-\theta s}/[(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)]$ 等传递函数表示,其中时间常数 τ_1 、 τ_2 和纯滞后时间 θ 的数量级一般在几十秒到几十分钟之间,常把上述的校正网络制成工业仪表产品,其参数可根据系统的实际需要,自由调整,这就成了工业用调节器。通常,超前型校正网络相当于比例微分调节器,滞后型校正网络相当于比例积分调节器,超前-滞后型校正网络相当于比例积分微分调节器。

一、理想的比例积分微分调节规律

调节器的框图如图1-1所示。测量值 C 为变送器的输出信号,例如对于DDZ-II系列仪表所组成的系统,测量值 C 为0~10mA的直流电流信号,设定值 R 与输出电流 I_o 亦为0~10mA,偏差信

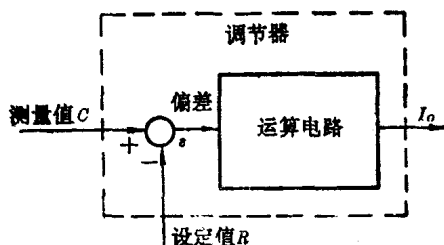


图1-1 调节器的框图

号 e 为

$$e = C - R \quad (1-1)$$

对于理想的比例积分微分调节器，其调节规律可用下式表示：

$$I_o(t) = \pm K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + I_R \quad (1-2)$$

式中 K_c 为调节器的比例增益； T_i 为调节器的积分时间； T_d 为调节器的微分时间； I_R 为 $t=0$ 、偏差信号 e 未加上的瞬间调节器的输出电流； K_c 前的正号用于正作用调节器，负号用于反作用调节器。

式(1-2)也可以写成

$$\Delta I = I_o - I_R = \Delta I_p + \Delta I_i + \Delta I_d \quad (1-3)$$

式中 ΔI_p 、 ΔI_i 和 ΔI_d 为调节器输出电流增量 ΔI 中的比例、积分和微分部分，分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_p &= \pm K_c e \\ \Delta I_i &= \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta I_p dt \\ \Delta I_d &= T_d \frac{d\Delta I_p}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

例 有一正作用电动调节器， $I_R = 3\text{mA}$ ， $K_c = 0.5$ ， $T_i = 10\text{min}$ ， $T_d = 2\text{min}$ 。在 $t=0$ 瞬间开始，加上如图1-2(a)所示的偏差信号，试画出 ΔI_p 、 ΔI_i 和 ΔI_d 的变化曲线，并求出 $t > 10\text{min}$ 时的 I_o 。

解： ΔI_p 与 e 成正比即 $\Delta I_p = K_c e$ ，可画出图1-2(b)，由式(1-4)可画出图1-2(c)和1-2(d)。

在 $t > 10\text{min}$ 时

$$I_o = I_R + 0.2 = 3.2\text{mA}$$

此3.2mA，就转化为新的 I_R 。

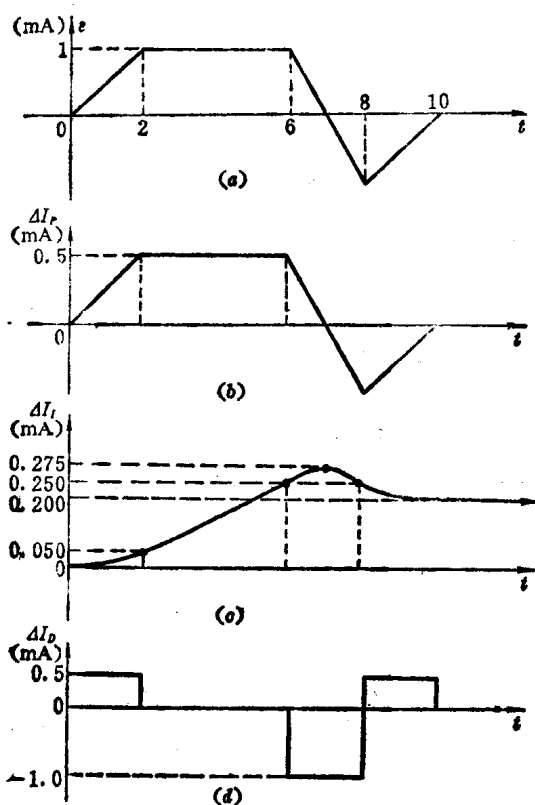


图1-2 理想的电动比例积分微分调节器在偏差 ε 作用下的 ΔI_P 、 ΔI_I 和 ΔI_D

在复变数 S 域上, 理想PID调节器的传递函数为

$$W(S) = \frac{\Delta I(S)}{\varepsilon(S)} = \pm K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (1-5)$$

二、实际的比例积分微分调节器的调节规律

实际上, 电动PID调节器的传递函数可用如下两个典型公式来表示:

$$W_{PID}(S) = \frac{\Delta I(S)}{e(S)} = \pm K_p F \frac{1 + \frac{1}{FT_i S} + \frac{T_d}{F} S}{1 + \frac{1}{K_i T_i S} + \frac{T_d}{K_d} S} \quad (1-6)$$

$$W_{PID}(S) = \frac{\Delta I(S)}{e(S)} = \pm K_p \left(\frac{1 + T_d S}{1 + \frac{T_d}{K_d} S} \right) \left(\frac{1 + \frac{1}{T_i S}}{1 + \frac{1}{K_i T_i S}} \right) \quad (1-7)$$

式中 K_p 为标称比例增益，当调节器输入输出为相同变化范围的电流或电压信号时， K_p 与比例度 P 之间成如下关系

$$K_p = \frac{100}{P}, \quad P(\%) = \frac{1}{K_p} \times 100 \quad (1-8)$$

F 为相互干扰系数，它与 T_d 、 T_i 的关系可用下式表示：

$$F = 1 + \alpha \frac{T_d}{T_i} \quad (1-9)$$

式中 α 为微分时间和积分时间之间的干扰因子； $K_p F$ 为考虑 F 后的实际比例增益； T_i 为标称积分时间，即调节器积分时间的刻度值； FT_i 为考虑 F 后的实际积分时间； T_d 为标称或刻度的微分时间； T_d/F 为考虑 F 后的实际微分时间； K_i 为积分增益， K_d 为微分增益。式(1-6)多用于由放大器加上PID反馈网络所构成的PID调节器；式(1-7)多用于由比例微分环节与比例积分环节相串联所构成的PID调节器，即所谓微分先行式PID调节器，式(1-7)可改写为

$$\frac{\Delta I(S)}{e(S)} = \pm K_p \frac{1 + \frac{T_d}{T_i} + \frac{1}{T_i S} + T_d S}{1 + \frac{T_d}{K_o K_i T_i} + \frac{1}{K_i T_i S} + \frac{T_d S}{K_o}}$$

因为 K_i 和 K_o 都是很大的正数， T_d 一般也小于或等于 T_i ，故上式分母上的 $T_d/(K_o K_i T_i)$ 项可忽略不计，故微分先行式PID调节器的传递函数也可写成式(1-6)，只是其相互干扰系数 $F = 1 + T_d/T_i$ ，即 $\alpha = 1$ 。然而微分先行式PID调节器的有些特点不能用传递函数表达，这将在第三章第四节中作深入讨论。

现说明如下一些问题：

1. 积分增益 K_i 是考虑调节器积分作用的非理想性而引进的指标。 K_i 愈大，调节器的积分作用愈接近理想。同样，微分增益 K_o 是考虑调节器微分作用非理想性所引进的指标。 K_o 愈大，调节器的微分作用也愈接近于理想。可是一般在考虑调节器在系统中的行为时，通常把 K_i 和 K_o 视为次要因素，其对系统动态性能的影响可忽略不计，于是PID调节器的传递函数通常可写为

$$W_{PID}(S) = \frac{\Delta I(S)}{e(S)} \approx \pm K_p F \left(1 + \frac{1}{F T_i S} + \frac{T_d}{F} S \right)$$

也就是把它近似地看作 $K_o = K_p F$ ， $T_i = T_i F$ ， $T_d = T_d/F$ 的理想PID调节器。

2. 相互干扰系数 F 是考虑当 T_i 和 T_d 或它们两者之一改变时，实际的比例增益、实际的积分时间和实际的微分时间都会随之改变，它们可用如下公式表示：

$$\left. \begin{aligned} K_o &= K_p F = K_p \left(1 + \alpha \frac{T_d}{T_i} \right) \\ T_i &= T_i F = T_i + \alpha T_d \\ T_d &= \frac{T_d}{F} = \frac{T_i T_d}{T_i + \alpha T_d} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

由上式可知, 改变 K_p , 只影响 K_o , 不影响 T_i 和 T_d , 但增加 T_i 时, T_i 和 T_d 均增加, 增加 T_d 时, T_i 和 T_d 也增加。相互干扰系数 F 表示 T_d/T_i 的变化量对比例增益、积分时间和微分时间的影响程度。由式(1-9)可知,

$$\left. \begin{aligned} T_d T_i &= T_d T_i \\ \frac{T_d}{T_i} &= \frac{T_d/T_i}{(1 + \alpha T_d/T_i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

由式(1-10)的第二式可知, 若 $\frac{T_d}{T_i} = 0$, 则 $\frac{T_d}{T_i} = 0$, $\frac{T_d}{T_i} \rightarrow$

∞ , 则 $\frac{T_d}{T_i} = 0$, 在 $\frac{T_d}{T_i} = \frac{1}{\alpha}$ 时, $d\left(\frac{T_d}{T_i}\right)/d\left(\frac{T_d}{T_i}\right) = 0$, 此

时 $\frac{T_d}{T_i} = \frac{1}{4\alpha}$ 为 $\frac{T_d}{T_i}$ 所能达到的极大值, 而其相互干扰系数 $F =$

2。由此可见调节器所能实现的 T_d/T_i 必然小于或等于 $1/(4\alpha)$ 。

由式(1-10)可写出

$$\alpha^2 \left(\frac{T_d}{T_i} \right) \left(\frac{T_d}{T_i} \right)^2 + \left(2\alpha \frac{T_d}{T_i} - 1 \right) \frac{T_d}{T_i} + \frac{T_d}{T_i} = 0$$

故在 T_d/T_i 已知时可用下式求取 T_d/T_i ,

$$\frac{T_d}{T_i} = \frac{(1 - 2\alpha T_d/T_i) - \sqrt{1 - 4\alpha T_d/T_i}}{2\alpha^2 (T_d/T_i)} \quad (1-12)$$

3. 如果微分时间 $T_d = 0$, 调节器没有微分作用, 成为比例积分调节器(PI调节器), 其传递函数为

$$W_{PI}(S) = \pm K_p \frac{1 + 1/(T_i S)}{1 + 1/(K_i T_i S)} \quad (1-13)$$

如果PID调节器的积分时间 T_i 为无穷大, 则调节器没有积分作

用, 成为比例微分调节器 (PD调节器), 其传递函数为

$$W_{PD}(S) = \frac{\Delta I(S)}{e(S)} = \pm \frac{1 + T_D S}{1 + \frac{T_D}{K_P} S} \quad (1-14)$$

如果调节器的微分时间 $T_D = 0$, 积分时间 T_I 为无穷大, 调节器即为纯比例调节器, 其传递函数为 $\pm K_P$ 。

第二节 实际PID调节器的参数

一、比例度 P

比例度是指调节器在纯比例状态下, 使调节器的输出信号变化其规定范围的100% (对于DDZ-II系列电动单元组合仪表的DTL型调节器, 此规定范围为10mA) 所需输入信号在其规定变化范围 (对于DTL型调节器, 此范围为10mA) 的变化百分数。比例度 P 与比例增益成反比。

二、积分时间 T_I

对于一个积分增益 K_I 趋向于无穷大的比例积分调节器, 在阶跃偏差信号 e 作用下, 其输出电流的增量 ΔI 可用下式表示:

$$\Delta I = I_o - I_s = \pm K_P \left(1 + \frac{t}{T_I} \right) e \quad (1-15)$$

若以 $\Delta I_P = \pm K_P e$, $\Delta I_I = t \Delta I_P / T_I$, 则 $\Delta I = \Delta I_P + \Delta I_I$ 。在 $t = T_I$ 时, $\Delta I_I = \Delta I_P$, $\Delta I = 2 \Delta I_P$ 。故积分时间 T_I 的定义为理想的比例积分调节器 ($K_I \rightarrow \infty$), 在阶跃信号作用下, 积分输出 ΔI_I 变化到与比例输出 ΔI_P 相等时所经历的时间 (如图1-3所示)。它又称倍值时间 (ΔI 变化到成为 ΔI_P 的两倍) 或再调时间。积分时间是衡量调节器的积分作用相对于比例作用强弱的指标, T_I 愈大, 积分作用相对愈弱。

三、积分增益 K_I

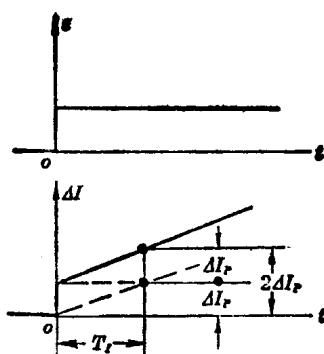


图1-3 理想比例积分调节器的阶跃响应

实际的比例积分调节器，由于 K_I 不会是无穷大，若在阶跃偏差信号 e 作用下，其输出为

$$\Delta I = \mathcal{L}^{-1} \left[\pm \frac{K_p \left(1 + \frac{1}{T_I S} \right)}{1 + \frac{1}{K_I T_I S}} \cdot \frac{e}{s} \right] = \Delta I_p (K_I - 1) (1 - e^{-\frac{t}{K_I T_I}}) \quad (1-16)$$

式中 $\Delta I_p = \pm K_p e$ 。由式(1-15)可知，当积分增益 K_I 趋于无穷大时，可证明 $\Delta I_I = t \Delta I_p / T_I$ ，相当于理想比例积分调节器的积分输出。由式(1-15)可画出实际比例积分调节器阶跃响应特性，如图1-4所示。

当 K_I 不趋向无穷大时， ΔI_I 以时间常数为 $K_I T_I$ 的指数曲线变化。当 $t \rightarrow \infty$ 时，由式(1-15)可知，

$$\Delta I_I|_{t \rightarrow \infty} = (K_I - 1) \Delta I_p$$

所以积分增益 K_I 为阶跃偏差信号 e 很小时，当比例积分调节器过渡过程结束后的输出 $\Delta I|_{t \rightarrow \infty}$ （它等于 $\Delta I_p + \Delta I_I|_{t \rightarrow \infty}$ ，由于 e 很小，可假定 $I_R + \Delta I|_{t \rightarrow \infty}$ 未达到调节器输出的饱和值）与比例输出 ΔI_p 的比值。 K_I 的数值愈大，调节器愈接近于理想积分，调节器用于