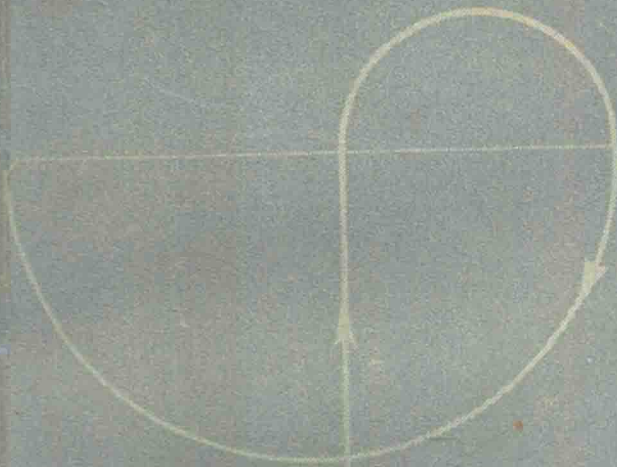


自动化丛书



工业电动调节器

(装置部分)

[苏联] E. K. 克魯格 O. M. 米妮娜著 甘和貴譯

上海科学技术出版社

自动化丛书

02

工业电动调节器

(装置部分)

(苏联) E. K. 克魯格 O. M. 米妮娜 著

甘和貴 譯 馬少梅 校

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。丛书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书系統地闡述苏联和其他国家的各种工业电动調节器的結構、特性及参数整定范围,并着重对目前世界各国的若干单元組合式調节仪表的构成形式和技术性能进行評述,举出了它們的优、缺点。

本书可供各个工业部門中,从事生产过程自动化和从事电动調节器研究、設計的工程技術人員,以及高等学校中热工仪表与自动装置、生产过程自动化等专业的师生閱讀。

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

Е. К. Круг и О. М. Минина

Госэнергоиздат • 1962

自动化丛书(42)

工业电动調节器(装置部分)

甘和貴 譯 馬少梅 校

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印張 5 28/32 排版字数 129,000

1964年10月第1版 1964年10月第1次印刷 印数 1-15,000

統一书号 15119.674 定价(科六) 0.70 元

原 序

在实施生产过程自动化时,正确选择调节器及其整定参数,有着极重要的意义。要做到这点,就只有在对不同调节器组成的系统的静态和动态性能进行了比较以及评价的基础上进行工作。诚然,根据已发表过的为数极少的几篇有关参数整定的文章,针对若干调节对象,对系统的动态性能进行计算,是可以得到一些比较数据的,但这将化费专业工程师们大量的时间。

一些文献中,缺少可供自动化工程师选择调节器型号的调节系统品质指标数据。本书力图填补这一空白。书中讨论了苏联各个单位和国外出产的各种电动调节器。调节器根据电路结构、调节规律、机械构造;也根据输入和输出数据、参数整定范围等等来分类。书中谈到的每一种调节器,都对其结构图、静态和动态特性、参数整定范围,以及在它们的研究过程中得到的结果,进行了叙述。同时还试图说明各种调节器的优点和缺点及其相互间的比较。

为了根据对调节过程提出的要求,正确选择调节器,书中提出了调节对象动态性能的确定方法及其近似特性。这种特性由一些便于研究闭环系统的典型方程式加以描述。

书中还谈到了如何根据调节对象的动态性能和对调节系统的品质要求,来选择调节器的型号及其整定参数。这只要根据作者们提出的品质指标数据,即可进行这样的选择。有了这些数据,无需对调节系统进行计算,即可判定在采用不同调节器时的过程品质,据此在作了一番比较、评价之后,就可选出必需的调节器及其整定参数。

第1章引述調节理論的若干知識，是为了便于讀者理解往后的內容；同时，为了避免涉及过多的数学运算，还放过了方程式的推导，而只用图表形式列出計算結果。

作 者

符 号 說 明

- φ ——被調量
- φ_0 ——被調量給定值
- $\varphi(0)$ 和 $\varphi(\infty)$ ——穩态时的被調量值
- $\Delta\varphi$ ——阶跃定值扰动
- $\Delta\varphi_m$ ——最大可能的阶跃定值扰动
- μ ——調节机构的調节作用或位置
- μ_m ——兩位調节器的調节作用或最大調节作用
- $\mu(0)$ 和 $\mu(\infty)$ ——穩态时的調节作用值
- $\mu_{\text{макс}}$ 和 $\mu_{\text{мин}}$ ——調节机构在极限位置时的調节作用值
- x ——被調量对給定值的偏差量
- x_a 和 x_{cp} ——在穩态时，振蕩工况中被調量偏差的幅值和平均值
- $x_{\text{ст}}$ ——調节系統的靜态誤差
- x_1 ——被調量的最大偏差
- x_0 ——电动机轉速达到最大值时的誤差訊号
- $x_{\text{вх}}$ 和 $x_{\text{вых}}$ ——各个环节的輸入和輸出坐标
- Δx ——能表征系統动态精度的被調量偏差
- M ——負載扰动
- ΔM ——阶跃負載扰动
- ΔM_m ——最大可能的負載扰动
- K_p ——調节器的傳遞系数(比例系数)
- $1/K_p$ ——靜差率,或不均匀度
- $K_{\text{ст}}$ ——靜态誤差系数
- K_k ——微分品质系数

$K, K_0, K_1 \sim K_4$ ——各个环节的傳遞系数

T, T_0, T_1, T_2 ——各个环节的时间常数

$T_{\text{и}}$ ——积分时间常数

$T_{\text{д}}$ ——微分时间常数

$T_{\text{см}}$ ——与调节机构移动速度和放大器输入电压有关的执行装置系数

$1/T_c$ ——调节机构移动速度

$T_{\text{дв}}$ ——电动机的机电时间常数

$T_{\text{и.м}}$ ——执行机构输出轴转动一整转的时间

$T_{\text{а}}$ ——稳态时的自振荡周期

2δ ——不灵敏区

2ε ——继电元件回线

τ ——滞后时间

$t_{\text{и}}$ ——脉冲作用持续期

$t_{\text{р}}$ ——调节时间

$t_{\text{р.и}}$ ——当负载阶跃扰动时的调节时间

$t_{\text{р.з}}$ ——当定值阶跃扰动时的调节时间

$t_{\text{онт}}$ ——最佳过渡过程时间

t^* ——超调量 20% 的过渡过程时间指标

$t_{\text{з}}$ 和 $t_{\text{р}}$ ——继电元件的闭合时间和开断时间

目 录

原 序

符号說明

第 1 章 自动調节理論的若干問題	1
1. 自动調节系統的功用、結構和实例	1
2. 环节的靜态特性	5
3. 环节的动态特性	7
4. 典型环节和調节器的分类	11
5. 环节的各种連接綫路及它們的特性	17
6. 开环和閉环調节系統的特性	19
7. 对調节系統动态性能提出的要求	24
第 2 章 兩位式調节器、恒速調节器、积分和比例調节器	27
8. 兩位式調节器	27
9. 恒速調节器	32
10. 积分調节器	45
11. 比例調节器	52
第 3 章 比例-积分、比例-积分-微分調节器	61
12. 調节器的結構图	61
13. 調节器中的积分和微分元件	65
14. 无調节机构位置反饋的調节器	100
15. 在調节机构位置反饋回路里采用 RC' 元件的調节器	117
16. 利用定位器的調节器	129
17. 調节机构位置反饋系数可調的調节器	149
18. 对上述各种型式的比例-积分和比例-积分-微分調节器 的評價	176

第 1 章

自动調節理論的 若干問題

1. 自动調節系統的功用、結構和实例

当实施生产过程自动化时,必須設法将一个或几个工艺量保持在一定水平上,或者使之按一定程序进行变化。这里指的工艺量可以是各种加热装置或一定物质的温度,也可以是压力、压差、液位、物量和成分等。为了满足上述要求,必須首先进行測量,然后使測量值与給定值进行比较,最后再对工艺过程施加影响,使得被測量值与給定值之間的差值尽可能地縮小。

上述过程称之为調節过程,而欲使之保持在一定水平上或按一定程序进行变化的量,称为被調量;由于受到影响被調量在其中发生变化、并为了測量被調量的值在其上装有敏感元件的工艺設備,称为調節对象。

調節对象的例子很多,例如:要求保持一定温度的金属加热炉;保持一定液位的液体容器;在燃燒期間保持一定廢气成分或压力的燃燒过程。

在能源变化时,調節对象受到影响,使被調量发生变化。影响的起因,可能是供給的燃料以及它的化学成分和温度发

生变化;加热蒸汽的温度和压力发生变化;流过加热炉的电流发生变化;或者是供給和排除管道截面发生变化等等。其中,一部分影响可能是由于人工或自动改变管道中擋板和閥門的位置、介质进給速度、切换开关位置等所引起的。这种施于調节对象的影响,表现为調节机构(PO)的移动,并称之为調节作用。

所有自动調节系統(CAP)的共同点是有閉环結構。图1

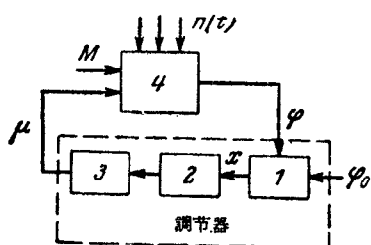


图1 自动調节系統的结构图

- 1—給定装置; 2—調节装置;
3—执行装置; 4—調节对象

即为这些系統的结构图。

由图看出,所研究的系統是一些单个元件或裝置的总合,它們单方向地一个作用于另一个,各自执行着完全确定的任务。

譬如,在給定裝置1中被調量 φ 和其給定值 φ_0 进行比较,如果这两个

量不相等,在裝置的輸出端就出現与差值 $\varphi - \varphi_0$ (被調量对其給定值的偏差)成正比的訊号 x 。这一訊号在調节裝置2中受到調变和放大,使之有足以操纵执行裝置3的功率。执行裝置或执行机构又作用到調节对象4上(μ 为調节作用)。这时,被調量就朝减小偏差 x 的方向发生变化。整个裝置(1、2、3)称为調节器,它能够在被調量偏离給定值时向对象施加影响,并保証必需的調节品质。

这样,单参数的自动調节系統就可认为是由調节对象和調节器构成的閉环系統。这个系統經常处于各种扰动的作用下。扰动可以分为三类(图1):負載扰动 M 、定值扰动 φ_0 和干扰 $n(t)$ 。

由于对象工况变化而引起的、并只作用于调节对象而与调节器无关的扰动,称为负载扰动^①;为了改变被调量的给定值而施于调节器定值部件的扰动,称为定值扰动;干扰——这种扰动与系统的正常工作不发生联系,并且很难于消除。它既可能在对象中出现,也可能存在于调节器中。

下面来研究几个自动调节系统的例子。

压力调节器 图2为压力调节系统。容器中压力由变送器进行测量,它将压力(被调量 φ)转换成膜片的位移,然后再转换成感应变送器次级绕组上的电压 u_φ 。这个电压与相应于压力给定值的电压 $u_{\varphi 0}$ 进行比较(给定值靠电位器 R_3 的触点进行调节)。被调量偏差 x (即 $u_\varphi - u_{\varphi 0}$)经放大装置 YY 加至执行机构,因此,执行机构输出轴转速与被调量偏差成正比。执行电动机 M 即移动调节机构(挡板),使容器中的压力减小或增大,从而回到给定值上。当被调量等于给定值时($x=0$),电动机不再动作,系统处于静止状态。

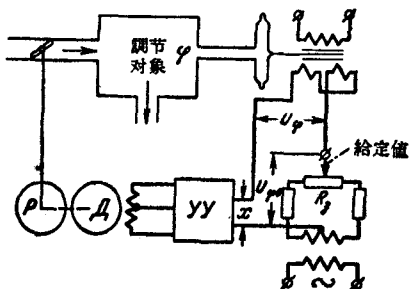


图2 压力调节器原理图。

出轴转速与被调量偏差成正比。执行电动机 M 即移动调节机构(挡板),使容器中的压力减小或增大,从而回到给定值上。当被调量等于给定值时($x=0$),电动机不再动作,系统处于静止状态。

温度调节器 图3为炉子或其他加热装置温度调节器的结构图。它用自动补偿器 AK 来自动检测温度并使之与温度给定值进行比较,然后将偏差信号送至调节装置。

加热装置温度 φ 用热电偶 TH 进行测量。热电偶的热电势 u_φ 在一定范围内与温度成正比。这一电势与来自测量变

① 这里讨论的负载扰动已折算到调节对象的输入端。——原注

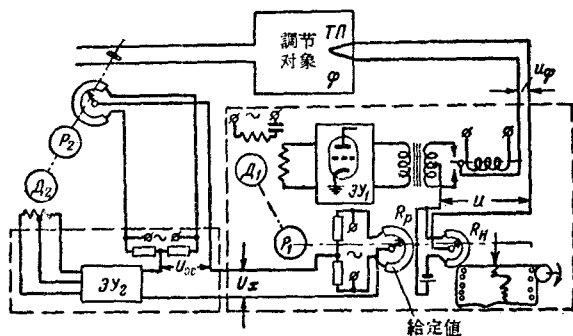


图3 温度调节器的原理图

阻器 R_n 上的电压 u 相比较, 电压差 $u_\phi - u$ 送至放大器。放大器的输入元件为振动变流器 $B\Pi$, 它把输入的直流讯号调制成交流, 然后经过电子放大器 $\mathcal{A}_1$ 的放大而作用到两相异步电动机 $\mathcal{A}_1$ 的绕组上。电动机通过减速箱 P_1 移动记录仪表的托架、测量变阻器 R_n 和调节变阻器 R_p 的可动触头。电动机旋转时, 触头也跟着转动, 直到电动机绕组上的电压 (也即 $\mathcal{A}_1$ 输入端电压) 等于零时为止; 因而在静态时, $u_\phi - u = 0$ 。仪表指示器 (记录笔尖) 和变阻器可动触头的位置, 与温度值一一对应, 也就是说自动补偿器的可动系统“追踪”着炉温变化并记录下温度值来。调节变阻器的触头位置表征温度值, 而变阻器本身的位置则决定温度的给定值 (在这种仪表里, 用手使变阻器相对于可动触头移动, 因此从调节变阻器①桥路上得到的电压 u_x 正比于炉温对给定值的偏差)。显然, 这里的补偿器不仅是温度记录器, 而且还是调节器的给定装置。

电压 u_x 送至控制执行电动机的放大装置 $\mathcal{A}_2$ 的输入端。电动机 $\mathcal{A}_2$ 通过减速器 P_2 移动调节机构 (管道中的挡板), 使

① 原文为记录变阻器。——译注

得送入对象的燃料和反馈变阻器的可动触头发生变化，直到反馈电压 u_{oc} 等于电压 u_x 为止。这时，调节机构的位置就与电压 u_x 成比例。在静态时，调节机构的每一个位置对应着一定的被调量偏差。

由所引用的实例看出，自动调节系统是由许多元件（环节）构成，因而元件的参数决定了调节系统的性能。

在一般情况下，自动调节系统的性能可用有限个微分方程组成的方程组来描述。通过对这种方程组的研究，就可以确定各个参数值（如放大系数、时间常数等等），从而使自动调节系统具有必需的性能。但要这样进行分析是极其困难的。如果能在稳定点的小偏差范围内对系统性能进行研究，则分析工作大为简化。在这种情况下，原始方程组有时可用线性方程组来替代（这个方程组能近似地描述自动调节系统在小偏差情况下发生的过程）。此外，如果方程中的系数为常数，还可以充分利用日臻完善的自动调节理论工具（以之确定系统的静、动态稳定界限）。下面就来讨论自动调节系统各个环节的特性。

2. 环节的静态特性

每一个环节（或环节链）的特性都可用某些输入量和输出量（坐标）来表示。所谓环节（或环节链）的静态特性是指输出量和输入量稳定值之间的关系

$$x_{\text{BLIX}} = f(x_{\text{BX}})$$

线性环节的静态特性用线性函数来表示，即

$$x_{\text{BLIX}} = a + K x_{\text{BX}} \quad (1)$$

式中 a ——由选定的坐标起始读数决定的常数；

K ——环节的放大系数或转移系数。

静态特性为非线性的环节称为非线性环节。图4是几种最常见的非线性环节特性。图4a为电子放大器和磁放大器等诸多电气元件具有的饱和特性；图4b为输出元件的移动受到终端开关限制的装置（例如带终端开关的执行机构，使调节机构的移动受到限制）的典型特性，其输出坐标受到限制；图4c为具有不灵敏区的特性，其输出坐标只有当输入坐标值 $x_{bx} > \delta$ 时才开始变化（例如输出轴带恒定负荷的电动机就具有这样的特性）；图4d为具有游隙的元件特性；图4e和图4f

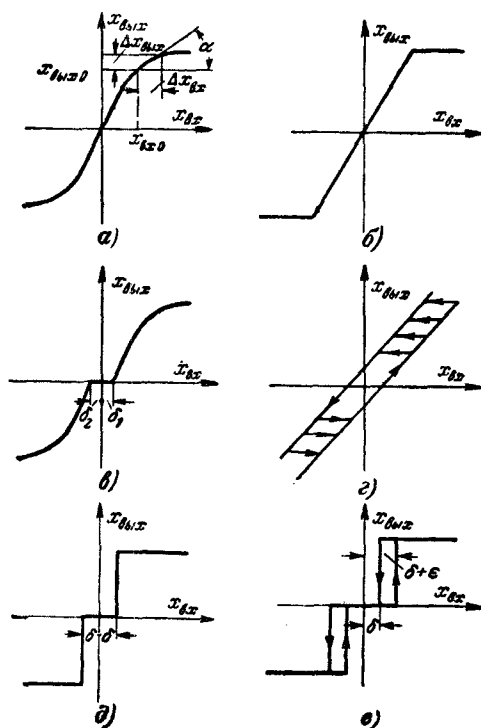


图4 非线性环节特性

均为继电器特性,不过前者为理想继电器的特性,当其输入坐标 x_{BX} 等于量值 δ 时,输出坐标即跃变至最大值,而后者则为实际继电器的特性,其吸上值 $(\delta + \varepsilon)$ 和释放值 (δ) 是不相等的,因而具有非单值的特性。当 x_{BX} 的变化范围很小时,对于某些非线性特性可以进行线性化。

假定图 4a 的特性在原始稳定状态时, x_{BLIX} 和 x_{BX} 的值分别等于 x_{BLIX0} 和 x_{BX0} 。如果相对于稳定值的偏移量 Δx_{BLIX} 和 Δx_{BX} 很小,则在这一区段上的曲线 $x_{BLIX} = f(x_{BX})$ 可用与曲线上点 x_{BLIX0} 相切的直线来代替。

环节的静态放大系数或转移系数与稳定值有关,并等于增量之比值^①

$$K = \frac{\Delta x_{BLIX}}{\Delta x_{BX}} = \operatorname{tg} \alpha$$

也有这样一些环节,在我们所需要的输入量变化范围里,没有静态特性。这样的环节通常用输出量的导数和输入量之间的关系来表征,并称之为无差环节。例如,执行机构的方程式就显示了执行机构转速和输入电压之间的关系

$$T \frac{dx_{BLIX}}{dt} = x_{BX}$$

无差环节在输入量为一定值时,其输出量可以为任意值。在这种情况下,就说环节没有自平衡性能。

这个术语,在调节对象分类时也经常用到,如说自平衡对象和无自平衡对象。

3. 环节的动态特性

对于具有一个输入端和一个输出端的调节系统环节链,

① 从本丛书 43 图 1a 可以看出,如何根据实验特性来确定放大系数。
——原注

不管它們的結構、工作原理以及其中的物理过程如何，只要其輸入坐标和輸出坐标之間的联系可用下列綫性微分方程①来描述，即称之为綫性环节鏈

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n x_{\text{BIX}}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{\text{BIX}}}{dt^{n-1}} + \dots \\ & + a_1 \frac{dx_{\text{BIX}}}{dt} + a_0 x_{\text{BIX}} \\ & = b_m \textcircled{2} \frac{d^m x_{\text{BX}}}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_{\text{BX}}}{dt^{m-1}} + \dots \\ & + b_1 \frac{dx_{\text{BX}}}{dt} + b_0 x_{\text{BX}} \quad (2a) \end{aligned}$$

一般說来，这个方程式的系数 $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ 可能与時間有关。在它們与時間无关的情况下，我們就說环节鏈的参数是恒定的。所謂綫性环节这个概念，是經過理想化的；对于真实环节或环节鏈的性能，只有在輸入量和輸出量变化范围很小的情况下，才能近似地用式(2a)形式的方程式来描述。

式(2a)还可以写成算子形式

$$\begin{aligned} & (a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) x_{\text{BIX}} \\ & = (b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0 \textcircled{3}) x_{\text{BX}} \quad (2b) \end{aligned}$$

① 有时采用更一般的定义。如果选加原則能适用于环节鏈，即当輸入作用为 $ax'_{\text{BX}} + bx''_{\text{BX}}$ 时，环节鏈的反应为 $ax'_{\text{BIX}} + bx''_{\text{BIX}}$ *，則說这是綫性环节鏈；式中的 x'_{BIX} 和 x''_{BIX} 为 x'_{BX} 和 x''_{BX} 相应的反应。根据这个意义，下面將談到的“迟后”环节[該环节 $x_{\text{BIX}}(t) = x_{\text{BX}}(t-r)$]，虽然不能写出象式(2a)那样的方程式，也可划为綫性环节。——原注

* 原文为 bx'_{BIX} 。——譯注

② 原文为 b_{m-1} 。——譯注

③ 原文为 $b_1 p b_0$ ， b_0 前漏 + 号。——譯注

式中 $p = \frac{d}{dt}$ ——微分算子^①。

根据线性环节(或系统)的微分方程式,可以决定其传递函数、过渡函数,或者时间特性、频率特性。这里,我们只限于讨论恒定参数系统。

线性环节(或系统)的传递函数 为微分方程式右端的算子多项式对左端的算子多项式之比^②

$$W(p) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} = \frac{d_1(p)}{d_2(p)} \quad (3)$$

以 $j\omega$ ($j = +\sqrt{-1}$) 代换传递函数 $W(p)$ 中的符号 p , 并把 ω 看作实变量。当 ω 取 $\omega_1, \omega_2 \dots$ 等各值时, 我们就在复平面上得到 $W(j\omega_1), W(j\omega_2)$ 等矢量的终端轨迹。当 ω 从 0 连续变到 ∞ 时, 矢量 $W(j\omega)$ 终端描绘出的曲线称为环节(或系统)的幅-相特性。这一特性有着简单的物理意义, 并易于用试验方法测得。

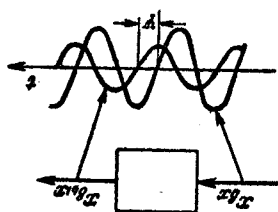


图5 环节的幅-相特性

假定有一环节具有式(3)那样的传递函数, 如在其输入端加上频率为 ω ^③ 的等幅简谐波

① 为了把方程式写成算子形式, 我们采用了符号:

$$p = \frac{d}{dt}; \quad p^2 = \frac{d^2}{dt^2}; \quad \dots \quad p^n = \frac{d^n}{dt^n}; \quad \frac{x}{p} = \int x dt; \quad \frac{x}{p^2} = \int dt \int x dt;$$

…其次, 并认为 p 是可以代数法则加以运算的量。式(26)与式(2a)经过运算微积, 并令初始条件为零而得到的方程式在形式上是相合的。这可参考 M. И. 康托洛维奇著运算微积和电路中的不稳定现象(ТИИТ), 1956。——原注

② 这里定义不够严格。读者可参阅自动调节原理专著中有关传递函数的定义。——译注

③ 我们假定, 量 $j\omega$ 不是传递函数分母的根。——原注