

# 精密 定位 技术

张琛 编



上海交通大学出版社

# 精密定位技术

张琛 编著

上海交通大学出版社

## 内 容 提 要

随着科学技术和工农业生产的不断发展,伺服定位技术已逐步形成一门较完整的学科体系,在各个科技领域中发挥着越来越大的作用,并朝着快速、高精度、数字化的方向迅速发展。本书结合作者近年来教学和科研工作方面的实践,对精密定位技术作了系统的叙述。全书共六章,分别介绍了开环定位系统、位置检测技术以及几种有关闭环定位系统设计的基本方法。

本书可作为大专院校计算机外部设备及自控专业师生的教学参考书,也可作为从事这方面工作的有关科技人员的阅读材料。

### 精 密 定 位 技 术

出版:上海交通大学出版社  
(淮海中路1984弄19号)

发行:新华书店上海发行所

排版:浙江上虞科技外文印刷厂

印刷:江苏太仓印刷厂

开本:850×1168(毫米)1/32

印张:5.75

字数:154000

版次:1991年4月 第一版

印次:1991年5月 第一次

印数:1—1730

科目:240—323

ISBN 7—313—00809—0/TP·39

定 价: 4.30 元

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1—1 磁头伺服定位技术的特点和发展概况 .....	1
§ 1—2 伺服定位系统的基本分类 .....	4
§ 1—3 磁头伺服定位系统的主要要求 .....	7
§ 1—4 定位控制系统的性能指标 .....	9
<b>第二章 步进电机原理及开环定位系统</b> .....	19
§ 2—1 概述 .....	19
§ 2—2 步进电机及其工作原理 .....	20
§ 2—3 步进电机的控制方法 .....	21
§ 2—4 细分技术及其应用 .....	24
§ 2—5 步进电机控制电路的一般问题 .....	26
§ 2—6 软盘驱动器中的磁头定位机构 .....	32
§ 2—7 软盘驱动器中磁头定位控制方法 .....	36
<b>第三章 位置检测技术</b> .....	48
§ 3—1 概述 .....	48
§ 3—2 光栅及其测位技术 .....	48
§ 3—3 感应同步器的工作原理及其测量技术 .....	56
§ 3—4 码盘 .....	65
§ 3—5 伺服盘及伺服码 .....	69
<b>第四章 音圈电机及快速伺服定位系统</b> .....	88
§ 4—1 概述 .....	88
§ 4—2 音圈电机的基本原理和分类 .....	89
§ 4—3 音圈电机的设计步骤 .....	94
§ 4—4 时间最优控制原理 .....	100

§ 4—5 电子测速器 .....	103
<b>第五章 变结构系统及其在定位系统中的应用 .....</b>	<b>108</b>
§ 5—1 概述 .....	108
§ 5—2 二阶系统的相迹 .....	109
§ 5—3 变结构系统的控制特点以及“滑模”存在的条件 .....	113
§ 5—4 二阶系统的 VSS “滑模”控制 .....	120
§ 5—5 降阶处理 .....	124
<b>第六章 计算机控制系统的设计 .....</b>	<b>127</b>
§ 6—1 概述 .....	127
§ 6—2 连续动态模型的数字化 .....	137
§ 6—3 PID 控制算法 .....	145
§ 6—4 快速有纹波计算机控制系统的设计 .....	156
§ 6—5 快速无纹波计算机控制系统的设计 .....	163
§ 6—6 快速最佳计算机控制系统的设计 .....	169
§ 6—7 控制公式的程序设计法 .....	176

# 第一章 绪 论

## § 1—1 磁头伺服定位技术的特点和发展概况

伺服定位技术仍是现代科学技术的基础技术之一，不论在航天、导弹等高精尖的国防军工系统或是在机械、冶金、矿山等国民经济基础工业中，都无不遍及定位技术的应用。伺服定位技术的每一进步和提高，均给上述领域带来巨大的效益。随着科学技术和生产不断发展的需要，伺服定位技术已逐步形成为一门较完整的学科体系，朝着快速、高精度、数字化的方向迅速发展，并活跃在各个经济部门和科学领域。

近年来，计算机技术已渗透到各个学科领域，有力地推动着它们发展，并成为其中必不可少的组成部分。从而使人类进入了信息时代。而从信息的观点来看，计算机系统的运行过程，可分为信息的存贮、采集、传输和处理等几大部分。随着计算机技术的飞速发展，对信息存贮的要求越来越高，它一方面要求存贮的容量不断增大，另一方面，又要求存取时间不断地减少。此外，还要求其体积越来越小。

磁盘驱动器是当代计算机主要的外部存贮器，而磁头定位系统又是磁盘驱动器中必不可少的重要组成部分，它与存取时间及存贮容量密切相关。自从1956年美国的IBM公司推出了305新型磁盘驱动器以来，仅30多年时间，磁盘驱动器就以惊人的速度向前发展着，其道密度已从原来的0.3道/厘米发展到60道/厘米。而平均存取时间已从原来的600 ms，减少到小于20 ms。这就意味着磁头在以接近1 m/s的平均速度运行时，能以不大于1  $\mu$ m的偏差随机定位在给定磁道上。无疑，这是一种相当高的

定位控制技术。

表 1—1 列举了近年来磁盘驱动器定位系统的发展概况。

从表 1—1 可以看出以下几个特点：

(1) 以有代表性的美国 IBM 公司的产品为例,在30多年时间内,平均存取时间缩短到原来的 3.3%,相当于提高了 30 倍。同时,由表 1—1 可知,平均寻道时间 ( $T_p$ ) 与整个平均存取时间 ( $T_v + t_p$ ) 的比例逐年下降,它已由原来占 95% 降为目前的 67% 以下。这说明,平均等待时间的进一步减少,相对来说是比较慢的。这是因为主要矛盾一直是寻道时间比较长的缘故。然而,目前两者之间已相差不大。要进一步缩短平均存取时间,则必须从两方面同时进行,这样才能收到较大效果。因此,磁盘转速有加快的趋势。

(2) 自从采用音圈电机驱动后,使平均寻道时间大幅度减少,但近年来进一步缩短的趋势并不显著,七八年间仍然徘徊在 20~30 ms 左右时间内。这是因为,在音圈绕组上产生的力和使音圈电机加速所必需的力都与音圈的重量成正比。因此,实际上存在着某种最小的极限。在考虑小型化和小功率化的合理性时,这一极限值估计为 10 ms 左右。

(3) 在 20 多年时间里,磁头驱动定位精度提高了 40 倍以上。特别是采用伺服盘进行随动控制以来,随着伺服定位技术的不断完善和更新,有力地促进着定位精度和速度的不断提高。不同情况下进行的实测结果表明,其定位精度可达  $1\ \mu\text{m}$  以下。由此可见,磁道密度进一步提高的潜力还相当大。

(4) 事物的发展是交错的。尽管音圈电机在缩短寻道时间方面表现出很大的优越性,但是,价格低廉、结构紧凑的步进电机却仍然广泛用于软磁盘机的开环定位系统中。同时,为了使结构紧凑和降低成本,步进电机在不少低容量的硬盘驱动器中也得到了应用。

综上所述,目前磁头伺服定位系统正朝着快速、高密度以及小

表 1-1 磁头定位系统的发展概况

磁盘存储器型号	公司名称	公布时间(年)	磁头驱动、定位方式	每毫米磁道数	平均寻道时间( $T_p$ )	平均等待时间( $t_p$ )	$\frac{T_p}{T_p+t_p}$	定位系统必需的定位精度( $\mu\text{m}$ )
305	IBM(美)	1956	一个取数臂先从50个盘中找盘,然后找道	0.8	600	23	0.95	125
1301	IBM(美)	1961	数字阀油压驱动方式;多个取数臂同时找道	2	183	—	—	50
1311	IBM(美)	1962	闭环伺服控制的油压驱动方式	2	150	20	0.892	50
2311	IBM(美)	1964	步进电机驱动方式	4	7	12.5	0.857	25
2314	IBM(美)	1965	步进电机驱动方式	4	60	12.5	0.83	25
9415-6	CDC(美)	1963	音圈电机驱动;伺服定位盘随动控制	37	33	8.34	0.78	12.5
3340	IBM(美)	1973	短音圈电机驱动;伺服定位盘随动控制	12	25	10	0.71	8.5
3350	IBM(美)	1975	短音圈电机驱动;伺服定位盘随动控制	19	20	10	0.667	5.3
4380	Maxtor(美国)	1985	音圈电机驱动;伺服定位盘闭环随动控制	42	27	12.5	0.684	2.4
1300	Siemens(西德)	1984	音圈电机驱动;伺服定位盘闭环随动控制	48	—	—	—	2
8760	Maxtor(美国)	1986	音圈电机驱动;伺服定位盘闭环随动控制	53	—	—	—	1.88



型数字化方向发展。而这三点要求集中在一起，无疑将大大增加了它的开发难度。此外，上述三点（即快速性、高精度以及小型数字化）也正是一般伺服定位系统的基本要求和发展方向。所以本书就以它为主要线索来展开对伺服定位系统的讨论。

## § 1—2 伺服定位系统的基本分类

伺服定位系统有各种各样的具体形式，其分类的方法也很多。但是总的说来可归纳为如下几种类型。

### 一、开环定位系统和闭环定位系统

伺服定位系统如按信号传递路径可分为开环系统和闭环系统两种形式。开环系统的结构很简单，给定一个输入，便有一个相应输出，但是输出量不可能很准确，尤其是系统有较大外界扰动时，变化更大。假如扰动可以预计或测量，则根据扰动大小对系统的输入进行相应的修正或补偿（亦即按扰动控制），可以使系统的输出有较准确的数值。复激直流发电机就是一个最简单的例子：当负载电流增加时，其激磁也随之增加，从而使端电压尽量保持在原来水平上不变，但精度仍不很高。

闭环系统的方框图如图 1—1 所示。图中  $\otimes$  表示比较器（或比较环节），在此输入与反馈信号进行比较，其差值输出即为误差

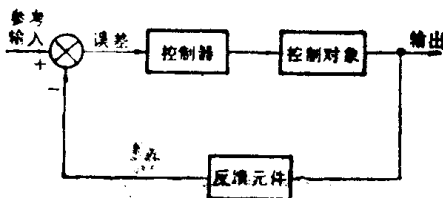


图 1—1 闭环系统框图

信号，它是控制器的输入。可以明显看出，作用信号按闭环传递，系统的输出对控制作用有直接影响（即有负反馈），这就是闭环系

统的特征。反馈的概念是自动控制系统中一个很重要的概念。控制系统中采用负反馈，除了降低系统误差、提高控制精度外，还使系统对内部参数的变化不灵敏以降低内部参数变化对输出的影响。对于一定的控制要求，就有可能采用不很精密的成本较低的元件构成控制系统，这在开环系统中是不能做到的。但是，实际系统一般都具有质量、惯性或延滞，由于采用了闭环控制，就有可能使系统的振荡加剧。甚至不能工作。反馈改变了控制系统的动态性能，也增加了问题的复杂性。本书将对它进行详细的讨论和研究。

## 二、线性系统和非线性系统

当系统中只要有一个非线性元件时，系统就要由非线性微分方程来描述，方程的系数将随变量大小而变化。用非线性微分方程描述的系统，称为非线性系统，反之，如果能用线性微分方程来描述的系统，则称为线性系统。严格地讲，实际上是不存在线性系统的，各种物理系统总是不同程度地具有非线性。例如放大器和铁磁元件有饱和特性，运动部件有间隙、摩擦或死区，弹簧有非线性特性等等。但当系统的信号变化不大，或者非线性不严重时，为了研究方便，就人为地将其简化成线性系统。

## 三、连续系统和离散系统

当系统各元件的输入信号是时间  $t$  的连续函数，各元件的输出也是时间  $t$  的连续函数时，则这种系统称为连续系统。连续系统的状态和性能一般是用微分方程来描述的。信号的时间函数允许有间断点（不连续点），或者某一时间范围内为连续函数。图 1—2 所示就是一个例子，在此  $t=0$  和  $t=t_1$  为间断点，而函数在  $0 \leq t \leq t_1$  范围内为连续。若系统是线性的又是连续的，则它就是线性连续系统。

当系统中只要有一个地方的信号是脉冲序列或数码时，这种

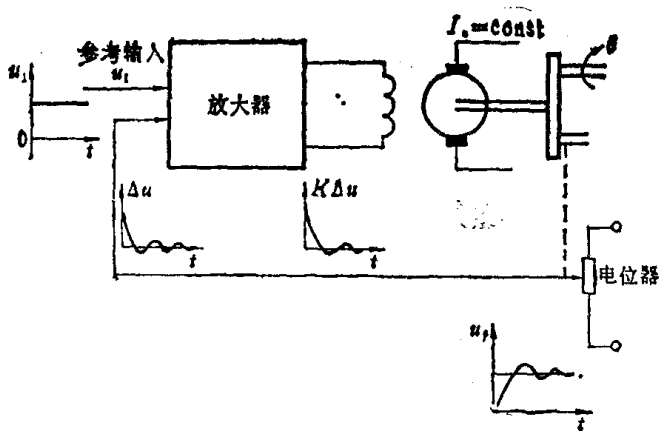


图 1-2 位置随动系统

系统称为离散系统。它的特点是：信号在特定的离散的瞬时  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$  上是时间的函数，两个瞬时点之间，信号是没有确定值的（见图 1-3）。

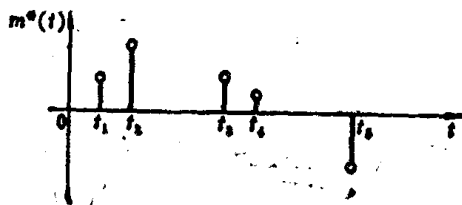


图 1-3 离散时间函数

离散时间信号可由连续信号通过采样开关获得。如图 1-4，采样开关每隔一定时间短暂闭合一次，就得离散时间信号脉冲序列  $m(t)$ 。具有采样的离散控制系统，叫做采样控制系统。如步进电机计算机控制系统（见图 1-5）就是离散控制系统的例子。如果再适当地加上反馈，就成为闭环离散控制系统。

离散控制系统的状态和性能，可通过差分方程来描述。若差分方程是线性的，则系统为线性离散控制系统。

定位控制系统的分类还有很多，如确定性系统和不确定性系统等等。我们就不在此细说了，请读者自行阅读有关参考资料。

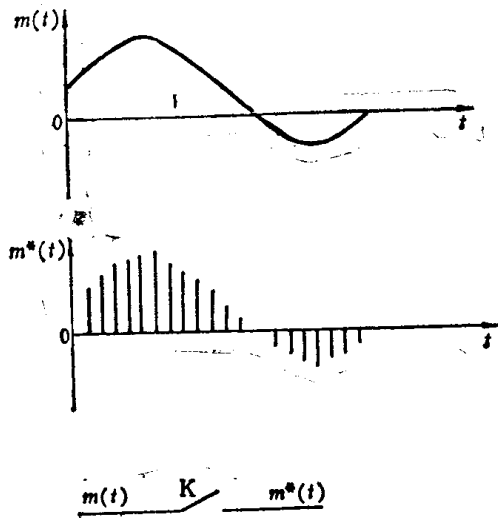


图 1—4 采样

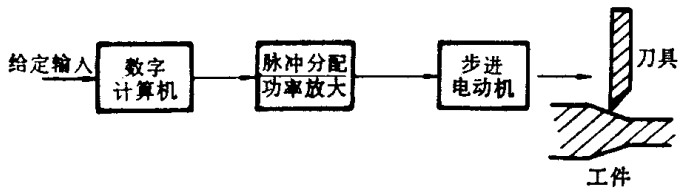


图 1—5 步进电机计算机控制系统

### § 1-3 磁头伺服定位系统的主要要求

磁头存贮器主要功能就是要使磁头在盘片的任意给定位置上进行信息的存取。为此，要求装在取数臂上的磁头能够沿盘面径向方向自由移动，以选取所要求的磁道位置。故要求其磁头驱动定位系统应完成以下基本职能：

- (1) 启动后(包括中途找道出错时)，使磁头准确定位在零磁道上，等待寻找磁道的指令；
- (2) 在工作过程中，能迅速地、精确地将磁头移动到指定的磁道中心位置，并可靠地使其定位于这一

位置上,即使在外界因素的干扰下,也能保持相对于正确位置的偏差在容许的范围内;(3)当出现故障或掉电时,能使磁头迅速退出记录区,使其得到保护,避免损坏。以上职能表明,关键问题是迅速的驱动和准确的定位。

由于磁盘存贮器始终围绕着增加存贮容量、提高存取速度、降低成本、减轻重量和缩小体积等方面的要求而不断发展着,故磁头驱动定位系统也随着上述要求不断更新、发展和完善。归纳起来,现代磁盘驱动器对磁头定位系统所提出的主要要求有如下几点:

(1) 定位精度高:定位精度是以随机寻道控制时,目标磁道位置与磁头实际位置之间可能存在的最大差值来衡量的。显然,所要求的定位精度与磁道密度有关。在目前技术水平下,所允许的定位误差值应在磁道间距的  $\pm 5\%$  以内。例如,对于磁密度为 1000道/英寸(1英寸=25.4毫米)的磁盘,其定位精度误差应小于  $\pm 1.25\mu\text{m}$ 。由此可见,定位误差问题是限制磁道密度进一步提高的重要因素之一。

(2) 平均寻道时间小:平均寻道时间是指磁头从起始磁道移动到目的磁道,并可进行读(写)信息时所需的平均时间。它不包括磁头在目的磁道上等待读(写)所需的平均等待时间。由于每次寻道长度是随机的,一般工程上均以满行程的  $1/3$  所需的时间作为平均寻道时间。目前,这一时间已达到  $16\sim 20\text{ms}$ 。进一步缩短寻道时间的工作将是艰巨的。在工作行程不缩短时,寻道时间的进一步缩短,将使驱动装置的功耗、体积、重量等参数迅速增加。因此,应根据需要与可能合理地拟定一个对平均寻道时间的要求。

(3) 在体积、重量、成本等方面应当满足磁盘驱动器的要求。

此外,还应在结构上保证使用维修方便,以及注意某些特殊要求。

## § 1—4 定位控制系统的性能指标

要评价一个系统的性能优劣,首先就要求有一个标准尺度,这就是所谓系统的性能指标,它包括:(1) 稳定性;(2) 稳态误差;(3) 瞬态性能指标;(4) 灵敏度。现对它们作一简要说明。

### 一、稳 定 性

这是任何控制系统所必须满足的最起码的要求。对于线性系统而言,只要该系统的闭环传递函数的极点  $s = -p$  均位于左半  $S$  平面时,则该系统就是稳定的。

### 二、稳 态 误 差

对于一个如图 1-6 所示的典型的反馈系统,其闭环传递函数为:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-1)$$

误差信号  $e(t)$  和给定值  $r(t)$  之间的传递函数为:

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{1}{1 + G(s)H(s)} \quad (1-2)$$

下面计算不同参考输入信号时的稳态误差。

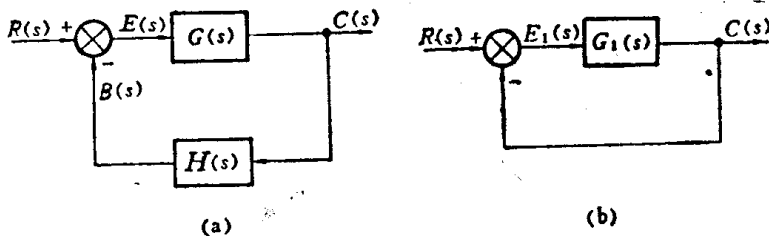


图 1-6 典型的反馈系统

#### (一) 单位阶跃输入时

设系统的输入为单位阶跃函数,按式(1-2),由终值定理可

得其稳态误差为：

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1 + G(s)H(s)} \frac{1}{s} = \frac{1}{1 + G(0)H(0)}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = G(0)H(0)$$

$K_p$  定义为位置误差系数，它实际上等于系统的开环传递系数。由此，

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p}$$

对于 0 型系统：

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(1 + T_1s)(1 + T_2s)\cdots}{(1 + T_a s)(1 + T_b s)\cdots} = K \text{ (开环传递系数)}$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K}$$

对于 1 型或高于 1 型系统：

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K(1 + T_1s)(1 + T_2s)\cdots}{s^N(1 + T_a s)(1 + T_b s)\cdots} = \infty \quad (N > 1)$$

$$e_{ss} = 0$$

上式中  $N$  表示系统的类型，如  $N = 0$ ，称为零型； $N = 1$  时，称为 1 型等。

可以看出，由于 0 型系统中没有积分环节，对阶跃输入的稳态误差为一定值：它的大小差不多与系统开环传递系数  $K$  成反比， $K$  愈大， $e_{ss}$  愈小，但总有误差，除非  $K$  为无穷大。所以这种没有积分环节的 0 型系统，又常称为有差系统。

对实际系统，是允许存在稳态误差的，只要它不超过规定指标就可以。所以有时为了降低稳态误差，常在稳定条件允许的前提下，增大  $K_p$  或  $K$ 。

若要求系统对阶跃输入的稳态误差为零，则系统必须是 1 型或高于 1 型，其前向通道中必须具有积分环节。

对图 1—2 所示的位置随动系统，其输出为转角  $\theta$ ，电动机含有一个积分环节，所以系统是 1 型系统。又由于它对阶跃输入的

稳态误差为零,且  $N=1$ , 故这种 1 型系统也叫做一阶无差系统。

(二)单位斜坡输入时

当参考输入为单位斜坡函数时,系统的稳态误差为

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{S}{1+G(s)H(s)} \frac{1}{s^2} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{sG(s)H(s)}$$

这时定义

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s)$$

为速度误差系数。于是

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v}$$

对于 0 型系统:

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{(1+T_0s)(1+T_b s)\cdots} = 0$$

$$e_{ss} = \infty$$

对于 1 型系统:

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{s(1+T_0s)(1+T_b s)\cdots} = K$$

$$e_{ss} = \frac{1}{K_v} = \frac{1}{K}$$

对于 2 型或高于 2 型系统:

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{s^N(1+T_0s)(1+T_b s)\cdots} = \infty \quad (N \geq 2)$$

$$e_{ss} = 0$$

上述分析说明, 0 型系统对于等速度输入(斜坡输入)不能紧跟, 最后稳态误差为  $\infty$ 。具有单位反馈的 1 型系统, 其输出能跟踪等速度输入, 但总有一定误差。为使稳态误差不超过规定值, 系统的  $K_v$  或  $K$  值必须足够大; 对 2 型或高于 2 型系统, 稳态误差为零, 这种系统有时称为二阶无差系统。

所以对于等速度输入信号, 要使系统稳态误差一定或为零, 必须  $N \geq 1$ , 也即必须有足够的积分环节数。



(三)单位抛物线函数(等加速度函数)输入时

这时,  $r(t) = \frac{1}{2}t^2$  ( $t \geq 0$ ), 所以稳态误差

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{1+G(s)H(s)} \cdot \frac{1}{s^3} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s^2 G(s)H(s)}$$

定义

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s)$$

为加速度误差系数。于是

$$e_{ss} = \frac{1}{K_a}$$

对于 0 型系统:

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{(1+T_a s)(1+T_b s)\cdots} = 0$$

$$e_{ss} = \infty$$

对于 1 型系统:

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{s(1+T_a s)(1+T_b s)\cdots} = 0$$

$$e_{ss} = \infty$$

对于 2 型系统:

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 \frac{K(1+T_1s)(1+T_2s)\cdots}{s^2(1+T_a s)(1+T_b s)\cdots} = K$$

$$e_{ss} = \frac{1}{K}$$

对于 3 型或高于 3 型系统:

$$K_a = \infty$$

$$e_{ss} = 0$$

所以当输入为单位抛物线函数时, 0 型和 1 型系统都不能满足要求, 2 型能工作, 但要有足够大的  $K_a$  或  $K$ 。只有 3 型或高于 3 型系统, 当它为单位反馈时, 系统输出才能紧跟输入, 且稳态误