

第4章 计算机控制系统的连续域-离散化设计

教学大纲

连续域—离散化的数字化设计方法的基本原理及步骤；连续控制器的离散化方法：一阶前向、后向差分近似法、Tustin 变换法、匹配 Z 变换法；设计举例：数字 PID 调节器设计。由于连续域—离散化设计法与当前航空航天飞控系统的数字化设计与实现紧密相关，具有更广泛应用价值，结合科研实例重点讲述。

学习重点

1、本章学习要求与重点

连续域-离散化设计方法的前提，是首先已经在连续域进行了设计，得到的控制律达到了设计要求并满足了各种性能指标，本章仅涉及将控制律离散化的过程。

该方法目前在航空航天飞行器控制领域得到了广泛的应用。一方面，大多数工程师都习惯于连续域设计，目前的 MATLAB 软件又提供了很好的设计分析软件工具，使得连续域设计更为简单，所以先在连续域设计，再进行离散化，成为目前复杂飞行器控制领域设计的首选方法；另一方面，由于我国有大量的旧型号飞行器需要由模拟控制改造为数字控制，其控制律早已存在，仅需要在改造过程中将模拟控制器改为数字控制器，因此本质上也是一个离散化的过程。这样，使得连续域-离散化设计方法成为目前计算机控制系统控制律设计的较为简单实用的方法，具有较重要的工程应用价值。

学习本章应注意掌握如下问题

（1）连续控制律离散化的条件

这个条件是：系统为低通（频带有限）、采样频率足够高。

多数控制系统的频带一般不高，可满足第一个条件。采样频率是由人选择的，依据设计要求可以提高，代价是需要计算速度快的计算机，也容易满足。

（2）离散化方法

在学习各种离散化方法时，需要掌握的要点是：

① 要记牢各种变换方法离散化公式以及各种变换方法的特性。应注意掌握如下几方面特性：

- 变换方法的映射特性;
- 变换方法的稳定性 (即变换前后环节的稳定性)
- 变换方法的稳态增益特性。如果稳态增益有变, 应加以补偿。
- 变换方法的脉冲响应或阶跃响应及频率特性。
- 变换方法零点、极点的数目。
- 变换方法的应用特点。

② 要注意各种变换方法特性不同, 各有优缺点。但不管哪种方法, 变换后所得等效环节与连续环节特性相比均有畸变, 畸变程度与采样周期、环节本身特性有关, 很难说哪种是最好的。但 **tustin** 变换法与其它几种方法相比, 由于其具有较好特性, 应用较多。一阶向后差分 and 匹配 z 变换方法也有较多应用。

③ 各种变换公式本质上都是 z 变换的特殊简化形式。变换后特性优于 z 变换。**Matlab** 软件提供了变换的算法和指令。

(3) **PID 离散方法**

PID 控制器作为单入/单出系统的一种有效的控制方法, 已经沿用了很多年, 目前仍然被广泛应用着。由于它同时可以兼顾系统的动态、静态特性而受到广大控制工程师的青睐。对于计算机控制系统来说, 主要工作是如何将连续域的 **PID** 控制律离散化以及如何对其进行改进。主要应注意掌如下几方面问题:

- ① 要牢记位置式及增量式两种基本 **PID** 离散公式, 以及各自的优缺点。
- ② 要注意利用计算机功能, 改进数字 **PID** 算法的几种方法。其中特别注意:
 - 产生积分饱和的机理及抗积分饱和各种方法, 要熟悉积分分离的具体算法。
 - 为克服 **PID** 算法中微分控制作用的缺点, 常用的改进微分算法。
 - 工程应用时所采用的其它措施。

③ 要注意工业中采用 **PID** 算法时, 主要参数并不是通过理论计算所得, 主要是在对被控过程特性测试的条件下, 依经验进行现场调试所得。所以, 应对几种常用的 **PID** 参数整定方法有所了解。

2、重点与难点问题说明

① 由于将连续控制系统转换为 **CCS** 时在系统中需加入 **ZOH**。而 **ZOH** 是一相位滞后环节, 因此会使系统特性变坏。为此在连续域设计时要检查加入 **ZOH**

后系统特性。如果影响较大，则应加入适当的补偿，或者减小采样周期。如果最初就将采样周期取得较小，则可以不进行这种检查。

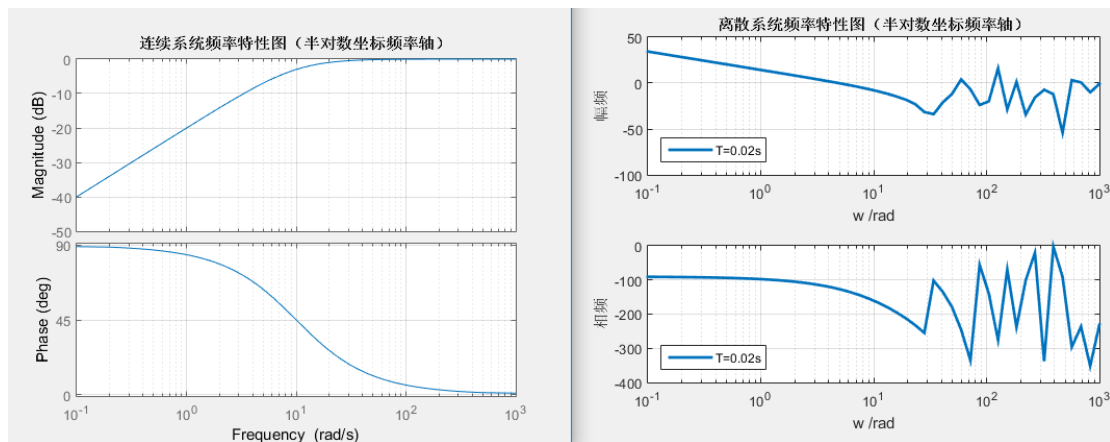
② 选取变换方法时，常常只能保证某一种或几种特性与连续环节相近，很难保证各种特性的一致性，特别是难于获得频率特性的逼真性。因此设计者必须确定哪种特性是该设计中最重要。

③ 双线性变换及预修正双线性变换主要用于低通控制器。高通控制器采用这种变换，由于频率特性畸变，高频特性向低频压缩严重，所以失真严重，故工程不易用于高通滤波器。

例如， $D(s) = \frac{s}{s+10}$ ，取 $T=0.02s$ ，关键频率为 $\omega_1 = 10$ 。

$$\text{预修正双线性变换可得 } D(z) = \frac{s}{s+10} \bigg|_{s=\frac{10}{\tan \frac{10 \times 0.02}{2}} \frac{z-1}{z+1}} = \frac{0.909(z-1)}{(z-0.817)}$$

频率特性如图 4-1 所示。从图 4-1 可见，低频特性相近，且可以保证在关键频率 $\omega_1 = 10$ 处频率特性相等，但高频特性相差较多。



(a) 连续频率特性

(b) 离散频率特性(预修正双线性变换)

图 4-1 频率特性比较