

doi: 10.7690/bgzdh.2013.02.021

# 地空通信测控系统伺服环路数字控制器

高留洋, 朱文, 桑振夏, 董俊

(中国人民解放军 63898 部队, 河南 济源 459000)

**摘要:** 作为地空通信测控系统伺服分系统的核心部件, 数字控制器需要满足不同角度范围的跟踪需求。针对小角度范围, 采用自适应二阶无静差 PID 控制器实现; 针对大角度范围, 采用开关控制实现; 并从方位支路和俯仰支路 2 个方面讨论了系统跟踪误差。分析结果表明: 该控制器实现了对速度输入量的误差跟踪和快速最优控制, 并保证天线的稳态性能和动态性能, 足以满足系统跟踪的精度需求。

**关键词:** 伺服环路; 数字控制器; PID 控制; 开关控制

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Digital Controller for Servo Loop of Air-Ground Communication Monitoring and Control Systems

Gao Liuyang, Zhu Wen, Sang Zhenxia, Dong Jun

(No. 63898 Unit of PLA, Jiyuan 459000, China)

**Abstract:** As the core component for the servo subsystem of the air-ground communication monitoring and control system, the digital controller needs to meet the needs of different angles range tracking. Use adaptive second-order non-static error of PID controller for the small angle range, and switch control for large angle range. The system error tracking is also discussed both from orientation slip and pitch slip. The analysis results show that the controller achieves error tracking and fast optimal control, and ensure the steady-state performance and dynamic performance of the antenna. In summary, the tracking accuracy of the system requirements is satisfied.

**Key words:** servo loop; digital controller; PID control; switch control

### 0 引言

伺服分系统是地空通信测控系统中重要的配套设备, 承担控制天线指向的重要作用<sup>[1-2]</sup>。伺服分系统为多环路闭环数字系统, 由内及外依次是电流环、模拟速度环和数字位置环<sup>[3]</sup>。模拟速度环由电流环、测速机和校正电路组成。在不同的工作模式下, 数字位置环的闭环路径各有不同。在手动和数字引导跟踪方式下, 由模拟速度环、D/A 变换模块、数字控制器、RDC 转换模块和测角旋变构成数字位置环, 根据相关工作模式下达的指令角度来控制天线的运行<sup>[4]</sup>。在自跟踪模式下, 数字位置环由目标发射机、天线、馈源、信道、跟踪接收机、A/D 变换模块及模拟速度环、D/A 变换模块和数字控制器构成, 伺服系统依据装备的状态方位和俯仰角误差作误差控制信号, 保证天线快速而平稳地向减小误差的方向运动, 从而达到跟踪目标的目的<sup>[5]</sup>。在整个多环路闭环数字系统中, 数字控制器是关键部件; 笔者设计了数字控制器, 以实现快速最优控制, 并保证天线的稳态性能和动态性能。

### 1 小角度范围伺服环路数字控制器设计

在小角度范围内, 首要考虑的是保证天线的稳

态性能和动态性能, 因而数字控制器采用自适应 PID 控制器实现, 其传递函数如式 (1) 所示。

$$D(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (1)$$

相应地, PID 控制器实现原理如图 1 所示。

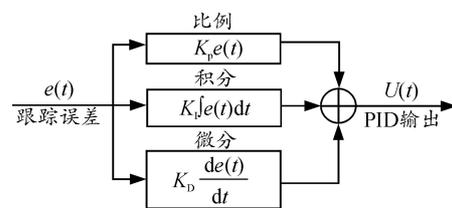


图 1 PID 控制器

由于含有纯积分项  $K_i \int e(t) dt$  和纯微分项  $K_d \frac{de(t)}{dt}$ , 因而跟踪系统为一个二阶无静差系统, 可以实现对速度输入量的误差跟踪。

为实现 PID 控制器的软件编程, 需将 PID 控制器离散化, 离散化之后的 PID 控制器如式 (2)。

$$D(Z) = K_p + \frac{T}{2} K_i \frac{1+Z^{-1}}{1-Z^{-1}} + \frac{2}{T} K_d \frac{1-Z^{-1}}{1+Z^{-1}} \quad (2)$$

离散化后的数字信号经 D/A 变换器送到模拟控制组合的模拟速度环。

系统中设计位置环带宽为 2.2 Hz, 设计参数为:

收稿日期: 2012-08-23; 修回日期: 2012-09-16

作者简介: 高留洋(1984—), 男, 河南人, 工学硕士, 助理工程师, 从事通信信号处理、通信对抗研究。

$K_p = 51.4, K_i = 140, K_D = -3.2。$

### 2 大角度范围伺服环路数字控制器设计

在大角度范围转动天线时，输入角度信号变化迅速，数字控制器设计为对速度输入量的快速最优控制。快速最优控制的开关线方程如式 (3) 所示。

$$\begin{cases} e = -\frac{\tau}{2} \frac{\dot{e}^2}{ku_m - b} & \dot{e} > 0 \\ e = \frac{\tau}{2} \frac{\dot{e}^2}{ku_m + b} & \dot{e} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

快速最优控制的相平面如图 2 所示。

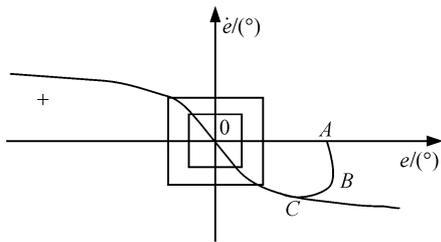


图 2 快速最优控制相平面图

图 2 中，横坐标为误差角，纵坐标为误差角的导数。快速最优控制过程为开关控制，当存在初始误差  $e = A$  时，开关信号为“+”，沿  $AB$  线加速，然后等速移向  $C$  点， $C$  为开关线上的一点，这时开关信号变“-”，沿开关线  $C \rightarrow 0$ 。

开关控制和 PID 控制器的转换条件：

- 1)  $|e| > c$  或  $|\dot{e}| > d$  为开关控制，标志  $F_k = FFH$ ；
- 2)  $|e| < a$  或  $|\dot{e}| < b$  为 PID 控制器，标志  $F_k = 00H$ ；
- 3)  $|e| < c$  或  $|\dot{e}| < d$ ，标志  $F_k = FFH$  为开关控制，

$F_k = 00H$  为 PID 控制器。

### 3 精度分析

天线伺服系统误差由 2 部分组成，其一为系统静差，包括角度传感器精度误差、光电轴误差等；其二为系统跟踪误差，即跟踪位置环闭环时的稳态误差。由于系统静差较小，所以针对方位支路讨论系统跟踪误差，俯仰支路类似。

由于数字位置环路 PID 控制器中含有积分项  $K_i \int e(t)dt$ ，因此使跟踪系统为一个二阶无静差系统，系统  $K_p$  和  $K_v$  为无穷大，对应的对速度输入量无稳态误差。所以系统跟踪精度应由正弦响应来考核。

正弦响应的曲线形式如式 (4) 所示。

$$y = A \sin \omega t \quad (4)$$

则有：

$$y' = A\omega \cos \omega t \quad (5)$$

$$y'' = -A\omega^2 \sin \omega t \quad (6)$$

对应取  $y'_{max} = A\omega$  为方位最大保精度跟踪角速度， $y''_{max} = A\omega^2$  为方位最大保精度跟踪角加速度。于是： $A\omega = 30, A\omega^2 = 10$ 。可得， $\omega = 1/3, A = 90$ 。于是，系统对于正弦信号  $y = 90 \sin 0.333t$  的稳态误差即可反映系统跟踪误差。

设系统开环传递函数为  $G_0(s)$ ，当输入  $r(t)$  为  $y = 90 \sin 0.333t$  的正弦信号时，对应的

$$R(s) = \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{30}{s^2 + 0.111} \quad (7)$$

$$E(s) = \frac{R(s)}{1 + G_0(s)} \quad (8)$$

$$e(t) = L^{-1}E(s) \quad (9)$$

相应的正弦响应仿真曲线如图 3 所示。

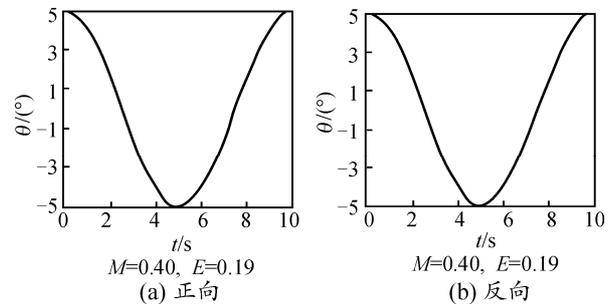


图 3 正弦响应仿真曲线

图 3 表明：系统对应振幅为  $90^\circ$ ，周期为 18 s 的正弦信号相应的稳态误差为  $0.19^\circ$ ，满足系统跟踪精度要求。

### 4 小结

针对小角度范围伺服环路的需求，采用自适应二阶无静差 PID 控制器实现数字控制器，可以实现对速度输入量的误差跟踪，并保证天线的稳态性能和动态性能。针对大角度范围伺服环路输入角度信号变化迅速的特点，采用开关控制实现数字控制器，实现了对速度输入量的快速最优控制。理论分析和仿真试验表明，笔者设计的伺服环路数字控制器足以满足系统跟踪精度需求。

### 参考文献：

- [1] 刘蕴才, 姚奇松, 房鸿瑞, 等. 遥测遥控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] 赵姚同, 周希朗. 微波技术与天线[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003.
- [3] 邵志龙. 无线遥测遥控系统的硬件实现[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2004.
- [4] 董谦, 谢剑英. 数字位置伺服控制系统设计[J]. 测控技术, 2002, 21(10).
- [5] 吴涛, 程耀瑜. 基于单片机控制的快速位置伺服系统的设计[J]. 测控技术, 2006, 25(12).