

# DVD 循轨伺服控制系统设计及参数优化

王晓健

(潍坊职业学院 机电工程系, 山东 潍坊 261031)

**摘要:** 在 DVD 循轨伺服控制系统中, 碟片的偏心会对循轨误差信号 TE(Tracking Errors) 产生周期性的扰动。为了有效抑制该干扰, DVD 循轨伺服控制系统引入了重复控制器。在稳定性条件的基础上设计重复控制器并提出参数优化的办法, 通过仿真验证重复控制器能显著有效地抑制频率已知周期干扰信号。

**关键词:** DVD; 循轨伺服; 重复控制; 周期扰动

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)11-0096-03

## Repetitive controller design and optimization for track-following servo system of an optical disk drive

WANG Xiao Jian

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Weifang Vocational College, Weifang 261031, China)

**Abstract:** In the track-following servo system of an optical disk drive, the eccentricity of optical disk will cause periodic disturbances on TE (tracking errors) signals. In order to restrain the disturbances effectively, repetitive algorithm is applied to DVD track-following servo system according the characteristic of disturbance. Based on the stability of repetitive controller, this paper promotes a mapped method to determine and optimize the parameter of repetitive controller. And through an experiment, it is verified that the designed repetitive controller has a remarkable performance to attenuate the periodic disturbance while preserving the overall stability.

**Key words:** DVD; track-following servo; repetitive control; periodic disturbances

DVD 光驱循轨伺服控制机构如图 1 所示, 其等效物理模型可以看成双车结构, 小车通过一个弹簧和阻尼器连接到大车, 它们之间存在着复杂的耦合关系。其中大车对应着粗调致动器, 一般是一台直流无刷电机, 主要用来长距离寻轨, 它有一个大的移动范围, 但是带宽比较小, 响应速度较慢。小车对应的微调致动器是一个音圈电机, 承载着激光读写器 OPU(Optical Pick-Up), 主要作用是短距离寻轨和循轨, 径向移动范围较小, 但是带宽比较大, 响应速度快, 比较灵敏。当光驱开始循轨时, 外界干扰(如震动、盘片偏心或者盘面划痕等)很容易引起激光读写器的光点不能聚焦于光盘的轨道中心, 而产生偏摆(Run-Out)现象, 甚至脱轨, 给准确高速读取 DVD 盘片带来困难。

### 1 问题描述

随着技术的进步, 光盘转速不断提高, 虽然光驱系

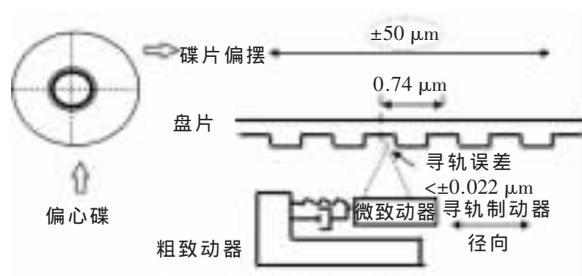


图 1 循轨伺服等效物理模型

统读取数据的速率得到加快, 但是, 不可避免的是, 其相应的周期干扰信号的频率也会因此提高。为了能够有效地控制高频段的周期干扰信号在要求的范围内, 系统闭环回路在相应高频段的增益也要提高。在 DVD 光驱循轨伺服控制系统的设计中, 有两个重要指标是必须考虑的: 一个是扰动抑制率(disturbance attenuation), 另一个是鲁棒稳定性(robust stability)。但是, 这两者之间是相互

矛盾的,需要寻找两者的平衡。例如,高闭环回路增益可以有利于扰动的抑制,但是会降低系统的稳定裕度。正因为这个原因,控制器的设计需要大量的实验,并且设计出的控制器因为阶次比较高,很难再应用于实际系统中。

因此,在光驱通知读取盘片时,单一的一个滞后超前控制器很难满足系统的要求。为了增强系统抑制周期扰动信号的能力,系统在原来的基础上加入了重复控制器,如图2所示。其中 $r$ 是系统输入, $y$ 是系统的输出, $d$ 是run-out干扰, $TE$ (tracking errors)是系统的循轨误差,控制器 $C(s)$ 为一滞后超前控制器,对象 $P(s)$ 是系统双车结构的辨识模型, $Cr(s)$ 是S.Hara在牺牲系统高频增益的前提下,提出的一种改进的重复控制器。此时,系统的开环传递函数 $G=Cr*C*P$ 。

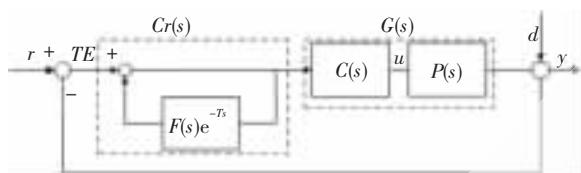


图2 含重复控制器的循轨伺服系统框图

## 2 重复控制器的设计及参数优化

### 2.1 重复控制器定义和稳定条件

重复控制器结构如图2中的 $Cr$ 所示。其中, $F(s)$ 为一个低通滤波器,一般取 $F(s)=1/(1+\tau s)$ , $e^{-Ts}$ 为一延迟环节,代表把信号延迟 $T$ 个时间单位, $T$ 为外界干扰信号的周期。S.Hara分析并提出了这种重复控制系统稳定条件。

定理:假设 $P(s)$ 和 $C(s)$ 没有不稳定的零极点对消,因而 $G(s)$ 没有隐含的不稳定极点,并且其输入、输出稳定性与最小实现的内部稳定性是一致的。这时,若:

- (1) $[1+G(s)]^{-1} \cdot G(s)$ 是稳定的有理函数代数式;
- (2)对于 $Q_F=F(s) \cdot [1+G(s)]^{-1}$ ,有 $\|Q_F\| < 1$ 。

则图2所示的含重复控制器的循轨伺服系统是指渐近稳定的。可见含有重复控制器的系统稳定性条件就是满足定理中的条件(1)和(2)。

### 2.2 重复控制器的设计

首先,根据循轨伺服规格ECMA-267设计一个串联滞后控制器 $G_1(s)=C_{lead} \cdot C_{lag}$ 和比例控制器 $K$ :

$$C(s)=K \cdot C_{lead} \cdot C_{lag}=K \cdot \frac{T_1s+1}{aT_1s+1} \cdot \frac{aT_2s+1}{T_2s+1} \quad (1)$$

可以得到系统的开环传递函数: $G(s)=C(s) \cdot P(s)$ ;此时,校正后 $|1+G(j\omega)|$ 的波特图符合循轨伺服规格ECMA-267,并且满足定理中的条件(1),如图3中的实线所示。

接着,设计重复控制器 $C_r(s)=\frac{1}{1-F(s)e^{-Ts}}$ ,实际上就是设计重复控制器中的2个参数 $T$ 和 $\tau$ 。如果光驱主轴马达旋转的角速度为 $\omega_0$ ,则因碟片偏心产生的周期干扰信号的周期为 $2\pi/\omega_0$ ,重复控制器中的参数 $T$ 一般选取

干扰信号的周期,即 $T=2\pi/\omega_0$ 。 $\tau$ 是利用重复控制器的稳定性条件(2)确定,条件(2)可等价于:

$$|1+G(j\omega)| > |F(j\omega)|, \forall \omega \quad (2)$$

其中 $F(j\omega) \approx 1, \forall \omega \in \Omega_T$ 。

由此,在波特图上分析式(2)的约束条件,可以得出系统稳定性的条件为 $|F(j\omega)|$ 位于 $|1+G(j\omega)|$ 下方。因此,只需设计在 $|1+G(j\omega)|$ 和 $|F(j\omega)|=1/\sqrt{1+\tau^2\omega^2}$ 不相交的范围使 $\tau$ 选择得尽量小即可。如图3所示,通过波特图得到 $\tau$ 的范围为 $\Omega_T=\{\tau|\tau \geq \tau_0\}$ ,即系统跟踪范围 $\Omega_\omega=\{\omega|\omega \leq 1/\tau_0\}$ 。图4显示重复控制器在指定频率处提升系统增益。

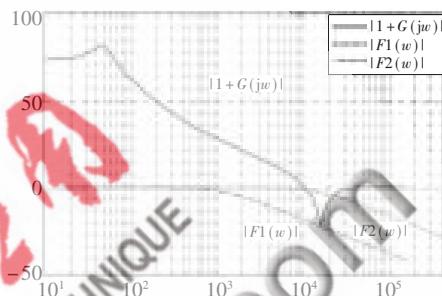


图3 设计中的 $F(s)$ 解决方案

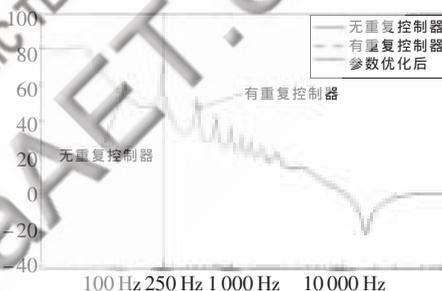


图4 含有重复控制器的系统波特图

### 2.3 重复控制器的参数优化

按照上述步骤设计出的重复控制器,一般 $\tau=\tau_0, T=2\pi/\omega_0$ 。但是经过多次试验发现, $\tau=\tau_0, T=2\pi/\omega_0$ 并不是系统最优的参数,即系统的稳定裕量还不是最大值。其中,参数 $T$ 和 $\tau$ 是在一定范围内变化的: $\Omega_T=\{\tau|\tau \geq \tau_0\}, \Omega_T=\{T|1.08 \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} \geq T \geq 1.2 \cdot \frac{2\pi}{\omega_0}\}$ 。不失一般性,令 $G(s)=\frac{s^m+b_{m-1}s^{m-1}+\dots+b_1s+b_0}{s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\dots+a_1s+a_0}$ ,令 $s=j\omega_0$ 代入上式得:

$$G(j\omega_0)=K_1+jK_2 \quad (3)$$

其中 $K_1, K_2, \omega_0$ 是与重复控制器有关的常数。

又欧拉方程 $e^{-Ts}=e^{-j\omega_0 T}=\cos(-T\omega_0)+j\sin(-T\omega_0)$ ,

$$F(s)=1/(1+\tau s) \text{ 代入式 } C_r(s)=\frac{1}{1-F(s)e^{-Ts}} \text{ 得:}$$

$$C_r(j\omega_0)=\frac{1+j\tau\omega_0}{1-\cos T\omega_0+j(\tau\omega_0+\sin T\omega_0)} \quad (4)$$

此时,系统闭环传递函数的幅值特性为:

$$f(T, \tau)=|1+C_r(j\omega_0) \cdot G(j\omega_0)| \quad (5)$$

易知,将式(3)和式(4)代入式(5),得到以 $T$ 和 $\tau$ 为自

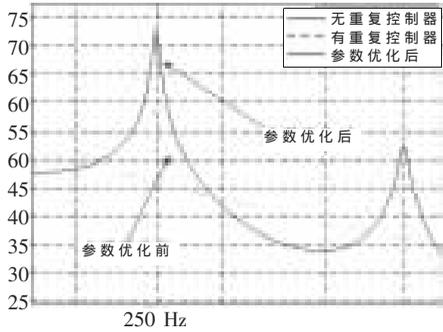


图5 系统 250 Hz 处波特图

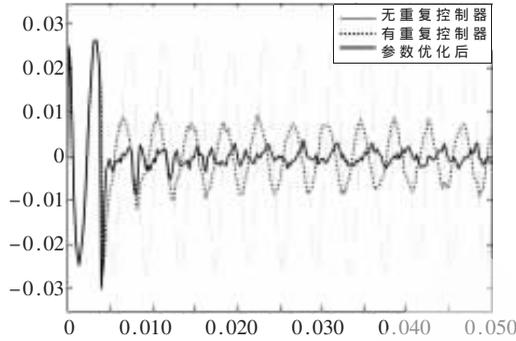


图6 误差输出对比

$$C_r(s)' = \frac{1}{1 - \frac{1}{1/5600s+1} e^{-\frac{1}{262.803}s}}$$

图5显示经参数优化后的重复控制器更加显著地提高系统增益,使系统达到最优。图6为系统的误差对比图,可见重复控制器显著有效地抑制了周期干扰信号。

本文的创新点在于提出了一种设计重复控制器参数

变量的二元非线性函数  $f(T, \tau)$ , 此时, 问题转化为含约束条件的优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{Max } f(T, \tau) \\ & \text{st } \tau \in \Omega_\tau = \{\tau | \tau \geq \tau_0\}, T \in \Omega_T = \{T | 0.8 \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} \leq T \leq 1.2 \cdot \frac{2\pi}{\omega_0}\} \quad (6) \end{aligned}$$

由于该问题是带约束条件的二元非线性函数优化问题, 不能给出和的解析解, 一般通过搜索算法利用计算机完成  $T$  和  $\tau$  的确定。

### 3 仿真与结论

由于碟片偏心而引起的系统干扰相当于一个频率与转速成正比的正弦信号, 现选取一个幅值为5个单位、频率为250 Hz的正弦波作为干扰源。从某一技术手册中得到某一DVD循轨伺服模型  $P(s) = \frac{3.62 \times 10^{12}}{s^4 + 10040s^3 + 6.23 \times 10^{10}s^2 + 6.77 \times 10^{12}s + 5.7 \times 10^5}$ , 作者根据ECMA-267标准设计了一滞后超前控制器  $C(s) = \frac{(s+2660)(s+0.3216)}{(s+85520)(s+0.01)}$  和比例控制器  $K=220000000$ 。设计

重复控制器  $C_r(s) = \frac{1}{1 - \frac{1}{1/6000s+1} e^{-\frac{1}{250}s}}$ , 经参数优化后

的图形化方法, 简单直观, 易于工程实现, 具有一定的实用价值。并且根据多次试验结果, 发现该方法设计的参数并不是系统最优, 即系统的稳定裕量还不是最大值, 作者提出了参数优化的思想, 给出了该优化问题的数学表达式, 达到了更好的周期干扰抑制效果。

### 参考文献

- [1] 中野道雄, 井上惠, 山本裕. 重复控制[M]. 吴敏, 译. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [2] DVD Forum: DVD specification for read-only disc-Part 1. Physical specifications, Version 1.1.1999.
- [3] HARA S, YAMAMOTO Y, OMATA T, et al. Repetitive control system: a new type servo system for periodic exogenous signals [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(7):659-668.
- [4] 赵海燕, 吴忠强. 逆变电源的自适应重复控制方案[J]. 微计算机信息, 2006, 22(16):50-51.

(收稿日期: 2009-12-04)

### 作者简介:

王晓健, 男, 1982年生, 讲师, 主要研究方向: 自动控制、电子技术、单片机。