

# 基于滑模变结构控制理论的光存储伺服 控制器设计

朱 路 阮 昊

(中国科学院上海光学精密机械研究所高密度光存储实验室, 上海 201800)

**摘要** 伺服控制器是光存储控制系统的基础,通过比较光学读取头下一时刻的位置指令和光电探测器探测的当前位置信号,经伺服控制器处理后输出电压信号,可以驱动电机带动光学读取头运动。为规避传统的经典控制方法,基于滑模变结构控制理论,设计出一种新型的光存储伺服控制器。该控制器对受控对象进行物理建模,建立受控对象的状态空间方程,设计相应的滑模切换面函数、滑模趋近律,从而得到内外环滑模变结构控制律。仿真结果显示,对比基于传统相位校正理论的伺服控制方法,其控制器阶跃响应的超调量和调节时间均较小,在增加有限的资源开销情况下,该伺服控制器具有更好的响应速度和稳定性能。

**关键词** 光数据存储;伺服控制器;滑模变结构控制;新一代多功能光盘;光学头

**中图分类号** TP333.4      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/CJL201138.0517001

## Design of Optical Storage Servo Controller Based on Sliding-Mode Variable Structure Control Theory

Zhu Lu Ruan Hao

(Laboratory of High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Servo controller is a fundamental component of the optical storage system. Processing the signal error between optical pick-up head (OPU) present position observed by the photo detector and the next position instruction, the controller generates a control signal which drives the motors in OPU. A new servo controller based on the sliding-mode variable structure control theory is researched. By means of building a physical model of the objective, the servo controller develops the state-space functions. A corresponding sliding-mode switching surface and the reaching law are also designed, and the inner-loop controller and outer-loop controller are finally designed. Compared with the classic controller based on phase correction theory, the simulation results show smaller overshoot and set time of the step response, which proves better response and robustness of the controller by increasing limited resource consumption.

**Key words** optics data storage; servo controller; sliding-mode variable structure control; next-generation versatile disc; optical pick-up head

**OCIS codes** 210.0210; 230.0230; 140.0140

## 1 引 言

光存储领域在近年来取得了较为深入的进展。国内相关研究机构提出了多种存储方法,如超分辨率存储<sup>[1]</sup>、多阶存储<sup>[2]</sup>、双光头多层存储<sup>[3]</sup>以及光磁混合存储<sup>[4]</sup>等。针对蓝光(BD)存储,目前国内有静态

测试系统方面的研究<sup>[5]</sup>,获得了较高伺服性能。此外,国外相关研究技术如超高密度的全息存储、基于相变材料的光存储理念<sup>[6,7]</sup>,为该领域提出了全新的方法。伺服控制器是该领域内光数据存储装置的重要组成部分<sup>[8]</sup>。当前绝大多数光盘数据存储的伺

收稿日期:2010-11-16;收到修改稿日期:2011-02-17

作者简介:朱 路(1986—),男,硕士研究生,主要从事光存储伺服控制方面的研究。E-mail:zhulumirror@yahoo.com

导师简介:阮 昊(1971—),男,博士,研究员,主要从事超高密度数字光存储技术、光学头技术、新型母盘技术等方面的研究。E-mail:ruan.hao@nercod.com.cn(通信联系人)

伺服控制器都是基于传统控制算法,如超前滞后相位校正或比例-积分-微分(PID)控制<sup>[9,10]</sup>。该经典方法虽然在工业应用上具有结构简单、应用成熟等优点,但是对于新一代多功能光盘(NVD)这样的高密度存储格式<sup>[11]</sup>,其物理格式更加严格,其物镜的数值孔径(NA)为0.65,DVD系统的NA为0.6;道间距为620 nm,而DVD系统的道间距为740 nm;NVD的最小记录坑点为380 nm,后者为400 nm;NVD的记录区间也比DVD要宽。这样的物理格式使得NVD盘片的存储容量比DVD提高了1倍,达到12 G乃至15 G;但是也带来相应较高的伺服性能要求,而传统伺服控制方法具有一定的局限性,不能满足该新型光存储系统的快速性和稳定性需求。

关于光存储伺服控制器的研究,国内外主要集中在数字控制器、自适应性控制等方面。文献[12]提出一种适应性滤波算法设计聚焦伺服控制器,可以产生前馈反向信号,迅速抑制外界的扰动,特别是低频信号造成的误差。文献[13]针对光存储的循轨伺服系统进行模拟,并提出通过反复逼近的方式调整输入量,提高系统响应速度。对自适应性、数字控制的研究是一种趋势,但是国内外的研究很少有关于新型光数据存储系统的伺服性能。本文把应用在航天器控制领域的滑模变结构控制方法<sup>[14,15]</sup>引入光存储伺服控制中,不仅规避传统的经典控制方法,而且由于滑模变结构控制本身的结构特点,可以兼顾系统的快速性和稳定性。

## 2 受控对象建模

光盘的伺服控制本质上就是通过控制算法来控制光学头,准确地访问盘片信息记录坑点。光存储伺服控制系统的框图如图1所示,主要由伺服控制器1,驱动模块2,光学头(OPU)3,盘片4,光电探测器5和数字信号处理(DSP)模块6构成。

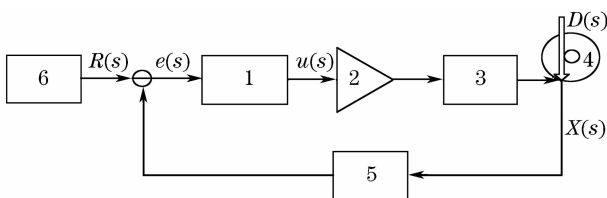


图1 光存储伺服控制系统框图

Fig.1 System diagram of optical storage control

与传统控制器控制流程类似,该控制系统是一个负反馈控制系统。设  $s$  为拉普拉斯算子,把光学头3的透镜3-b下一时刻的位置指令  $R(s)$ ,与光电

探测器5测得当前光学头透镜3-b位置信号  $X(s)$  作差,得到误差信号  $e(s)$ 。将该误差信号  $e(s)$  输入到伺服控制器1中,根据相关控制律运算,经过电机驱动模块2,光学头3中的线圈3-a产生驱动力,带动光学读取头3的透镜3-b完成相应的伺服动作。由光电探测器5探测当前光学读取头3的透镜3-b的位置信号  $X(s)$ ,经过负反馈和输入指令  $R(s)$  作差。 $D(s)$  为外部干扰信号。

受控对象3的建模分为运动学建模、电路建模和系统鉴别3个部分。

### 2.1 运动学建模

图2为光学头3的物理模型示意图,光学头3主要是由线圈3-a和透镜3-b组成的机电系统。它们的连接关系是:线圈3-a产生驱动力,带动透镜3-b运动。

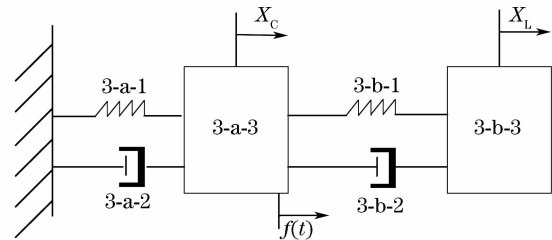


图2 光学头运动模型图

Fig.2 OPU movement model

如图2所示,光学读取头3由线圈等效弹簧3-a-1,线圈等效阻尼3-a-2,线圈质量块3-a-3,线圈与透镜间等效弹簧3-b-1,线圈与透镜间等效阻尼3-b-2,透镜等效质量块3-b-3几个部件组成。由运动学定律得到线圈3-a的运动方程

$$M_C \times \ddot{X}_C + B_i \times \dot{X}_C + K_f \times X_C + B_{LC} \times (\dot{X}_C - \dot{X}_L) + K_{LC} \times (X_C - X_L) = f(t), \quad (1)$$

透镜3-b的运动方程

$$M_L \times \ddot{X}_L + B_{LC} \times (\dot{X}_L - \dot{X}_C) + K_{LC} \times (X_L - X_C) = 0, \quad (2)$$

式中  $M_C$  为线圈等效质量块3-a-3的质量,  $K_f$  为线圈等效弹簧3-a-1的弹性系数,  $B_i$  为线圈等效阻尼3-a-2的阻尼系数,  $M_L$  为物镜等效质量块3-b-3的质量,  $K_{LC}$  为线圈与透镜间等效弹簧3-b-1的弹性系数,  $B_{LC}$  为线圈和透镜间的等效阻尼3-b-2的阻尼系数,  $X_C$  为线圈3-a的位移,  $X_L$  为物镜3-b的位移,  $f(t)$  为线圈3-a产生的驱动力。

### 2.2 电路建模

图3是光学头中线圈3-a的等效电路图。根据

电磁感应原理,得到伺服光学头中线圈3-a的电路方程

$$V = R \times i + L \times \frac{di}{dt} + V_m, \quad (3)$$

式中  $V$  为线圈3-a的输入电压,  $i$  为线圈3-a通过的电流,  $R$  为线圈3-a的阻抗,  $V_m$  为线圈3-a产生的反电动势。线圈3-a的电感  $L$  为

$$L = N^2 \times \mu_0 \times \frac{A_c}{(N-1) \times g}, \quad (4)$$

式中  $N$  为线圈3-a总圈数,  $A_c$  为线圈的面积,  $g$  为线圈之间的间距,  $\mu_0$  为磁导系数。考虑到线圈数比较多,  $N$  与  $N-1$  比较接近, 所以近似地有

$$L = N \times \mu_0 \times \frac{A_c}{g}. \quad (5)$$

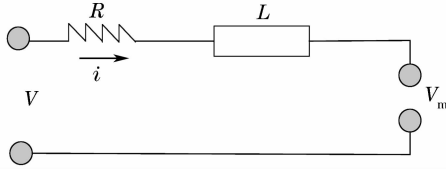


图3 光学头中线圈的等效电路图  
Fig. 3 Equivalent circuit of OPU coil

根据基本的电磁理论,可以推导出电流通过线圈3-a产生的驱动力为

$$f = i \times L_c \times B_c = i \times K_v, \quad (6)$$

式中  $L_c$  为线圈3-a的总长度,  $K_v = L_c \times B_c$ , 即磁场强度  $B_c$  与线圈长度  $L_c$  的乘积。线圈3-a由运动产生的反电动势为

$$V_m = L_c \times B_c \times V_c = K_v \times V_c = K_v \times \dot{X}_c, \quad (7)$$

式中  $V_c$  为线圈3-a的移动速度,  $V_c = \dot{X}_c$ 。

将(1)~(7)式联立,作拉普拉斯变换后,可得模型结构如图4所示。其中

$$G_4(s) = \frac{G_1(s) \times G_2(s)}{1 - G_2(s) \times G_3(s)}, \quad (8)$$

$$G_1(s) = \frac{1}{M_c \times s^2 + (B_f + B_{LC}) \times s + (K_f + K_{LC})}, \quad (9)$$

$$G_2(s) = \frac{B_{LC} \times s + K_{LC}}{M_L \times s^2 + B_{LC} \times s + K_{LC}}, \quad (10)$$

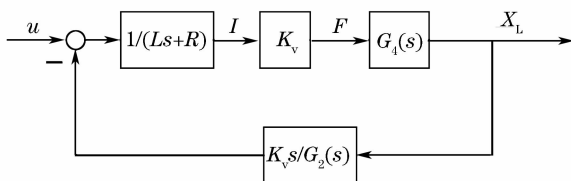


图4 光学头物理模型结构图  
Fig. 4 OPU physical model diagram

$$G_3(s) = \frac{K_{LC} + B_{LC} \times s}{M_c \times s^2 + (B_f + B_{LC}) \times s + (K_f + K_{LC})}. \quad (11)$$

物理模型表示的是光学读取头3输出的位移信号  $X_{OPU}$  对于输入电压信号  $u(s)$  的关系。由于驱动电路的时间常数  $\tau = L/R$  一般都非常小,而且光学头的线圈3-a和透镜3-b的连接部件刚性也较强,所以  $B_{LC}$  可以忽略不计。经过(8)~(11)式的简化后,可以将光学读取头3表达为一个二阶系统,其传递函数为

$$\frac{X_{OPU}(s)}{u(s)} = \frac{K_v}{M \times s^2 + [B_f + (K_v^2/R)] \times s + K_f}, \quad (12)$$

式中  $M = M_L + M_c$  为光学头的总质量。

至此,已建立光学头的物理模型,为一个典型的二阶系统。该系统的各项系数可通过控制系统鉴别获得。控制系统鉴别法为获取控制系统参数的通用方法,其方法为:将该系统看作一个黑盒子,给定阶跃信号作为输入信号,测量其输出的阶跃响应。由所测量的阶跃响应超调量、调节时间以及输入的阶跃信号,反推得到系统的各项系数。由于受控对象为标准元件,可参照文献[16]所示的模型鉴别方法。

受控对象光学头的系统传递函数为

$$\frac{X_{OPU}(s)}{u(s)} = \frac{a_3}{s^2 + a_1 \times s + a_2}, \quad (13)$$

式中  $a_1 = 119.75, a_2 = 1.57 \times 10^5, a_3 = 4.6 \times 10^7$ 。

### 3 滑模变结构控制器设计

滑模变结构控制器的设计首先需要选择合适的状态变量,建立受控对象的状态空间;其次设计相应的滑模切换面方程,将控制的变量与状态空间联系起来;最后选择合适的趋近律,以满足相应的快速性和鲁棒性要求。

滑模变结构控制器通过内环控制器和外环控制器两部分共同作用,达到控制光学头按照指令运动的目的。外环控制器通过电压信号来控制运行速度变量,内环控制通过速度变量来控制位置变量。

#### 3.1 受控对象的状态空间

传递函数是系统输入输出关系微分方程的拉普拉斯变换,而状态空间方程是根据系统微分方程得到的,即系统传递函数与状态空间方程是耦合的。根据现代控制理论的状态空间表示法,选取内部变量透镜位置  $X_L$  和其导数分别作为状态变量,即  $X_1 = X_L, X_2 = \dot{X}_L$ 。从而可以构建起系统的状态空

间方程

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \times \mathbf{X} + \mathbf{B} \times u, \quad (14)$$

式中  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$ ,  $u$  为输入信号。

参考(13)式,即所得的二阶物理模型传递函数,可以得到

$$A_{11} = 0, A_{12} = 1, A_{21} = -a_2, \\ A_{22} = -a_1, B_1 = 0, B_2 = a_3.$$

### 3.2 内环控制器设计

参考图1中信号流程图,设下一时刻的位置指令为  $X_{1c}$ ,即光学头的目标位置,其导数为  $\dot{X}_{1c}$ 。则目标位置与实际位置之间的误差信号为  $e_1 = X_{1c} - X_1$ 。设计内环滑模切换面函数  $S_1$  与误差信号相关,即

$$S_1 = e_1. \quad (15)$$

内环控制器的滑模趋近律采用指数趋近律

$$\dot{S}_1 = -\epsilon_1 \times \text{sgn}(S_1) - k_1 \times S_1. \quad (16)$$

趋近律的质量与  $\epsilon_1$  和  $k_1$  的选取有直接关系。当  $\epsilon$  过大时,其优点是通过  $\text{sgn}$  函数缩短了趋近时间,保证了趋近速度,但是  $\epsilon$  过大时会导致系统到达切换面的速度过大,容易引起系统产生较大的幅度抖动。相应的  $\epsilon$  过小也会有对应的缺点。 $\epsilon$  可用的范围在0.1~1.2之间,在此范围内,既可以保证趋近速度在大范围内快速地收敛到切换函数  $S$  上,且使运动点到达切换函数  $S$  时的速度很小,这样不但提高系统的控制速度,而且可以控制系统误差。而由于指数趋近项  $\dot{S} = -k \times S$  的存在,保证系统逼近切换面是一个指数渐近的过程, $k$  可用的范围在25~35之间,在此范围内可以保证系统的趋近律质量。

通过联立切换函数(15)式,内环滑模趋近律(16)式和状态空间方程(14)式,可以得到内环控制器的控制律

$$X_2 = \dot{X}_1 = \dot{X}_1 - \dot{X}_{1c} + \dot{X}_{1c} = \dot{S}_1 + \dot{X}_{1c}. \quad (17)$$

### 3.3 外环控制器设计

外环控制器的目的是通过电压控制信号  $u$  来控制光学头到达指定位置时的速度。设下一时刻的目标速度为  $X_{2c}$ ,选取该速度值  $X_2$  作为状态变量。则目标速度与实际速度之间的误差信号为  $e_2 = X_{2c} - X_2$ 。与内环控制器类似,设计外环滑模切换面函数为

$$S_2 = e_2, \quad (18)$$

与内环控制器类似,外环控制器也采用指数趋近律

$$\dot{S}_2 = -\epsilon_2 \times \text{sgn}(S_2) - k_2 \times S_2. \quad (19)$$

通过联立外环切换函数、趋近律和状态空间方程,可以得到外环控制器控制律

$$u = \frac{1}{a_3} \times (\dot{S}_2 + \dot{X}_{2c} + a_2 \times X_1 + a_1 \times X_2). \quad (20)$$

将内环控制器的控制律左边  $X_2$  作为外环控制器的目标速度  $X_{2c}$ ,如此联立(17),(20)式,可以得到滑模变结构控制器的控制律

$$u = \frac{1}{a_3} \times (\dot{S}_2 + \ddot{S}_1 + \ddot{X}_{1c} + a_2 \times X_1 + a_1 \times X_2). \quad (21)$$

式中  $\ddot{S}_1$  和  $\ddot{X}_{1c}$  分别为  $S_1$  和  $X_{1c}$  的二阶导数。通过外环控制器来控制光学头达到指定位置的速度,通过内环控制器来控制光学头达到指定的位置。内外环结合,即完成整个滑模变结构控制器的设计。

## 4 仿真分析

### 4.1 Matlab 仿真

传统的光存储伺服控制都采用超前滞后校正方法,如文献[11]ECMA-267中介绍的相位校正控制器,该归一化伺服传递函数为

$$H_s(j\omega) = \frac{1}{3} \times \left( \frac{\omega_0}{j\omega} \right)^2 \times \frac{1 + (3j\omega/\omega_0)}{1 + [j\omega/(3j\omega_0)]}. \quad (22)$$

该控制器通过调整相位校正的方法来消除稳定误差,提高系统的响应速度。其中模型的参数为  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0 = 2$  kHz。该控制器控制 NVD 光学头的阶跃响应如图5所示。可以看出其超调量约14%,调节时间约为0.2 s,稳态误差小于3.3%。

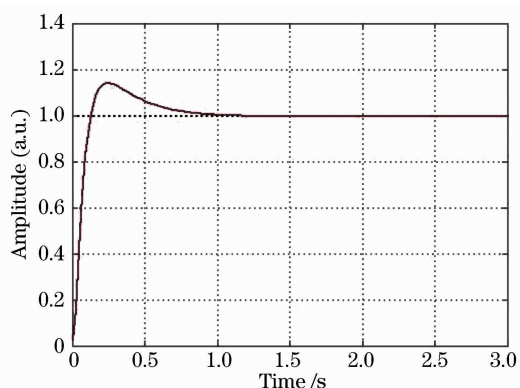


图5 传统相位校正控制器阶跃响应曲线

Fig. 5 Step-response of traditional phase-correction controller

而针对本文提出的伺服控制器,调整其内外环控制器的趋近律参数,将其分别设为  $\epsilon_1 = 0.8, \epsilon_2 = 1.1; k_1 = 30, k_2 = 32$ 。可以得到该滑模变结构控制器在 Matlab 中的仿真结果。其阶跃响应如图6所

示。可以发现超调量为3.7%，调节时间约为0.1 s，稳态误差小于1.5%。

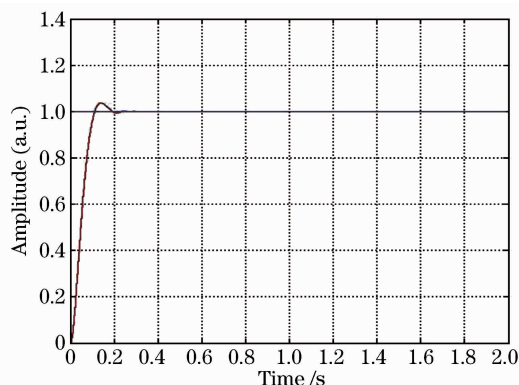


图 6 滑模变结构控制器阶跃响应曲线  
Fig. 6 Step response of sliding-mode variable structure controller

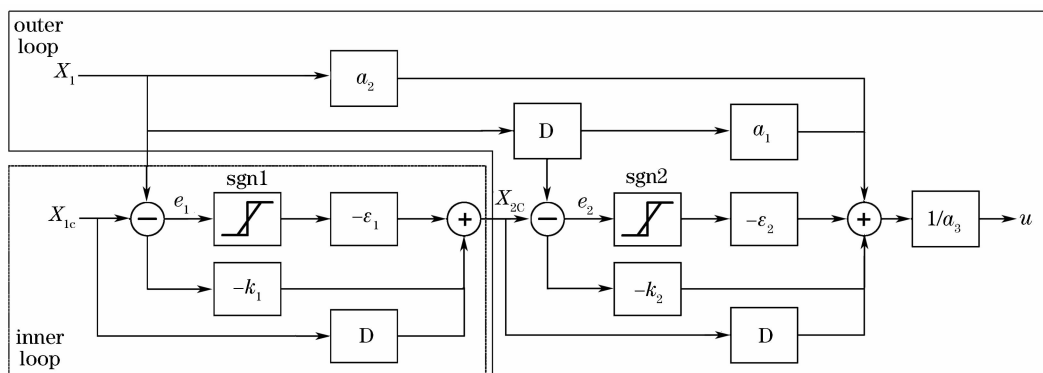


图 7 滑模变结构伺服控制器原理结构图

Fig. 7 Servo controller diagram based on sliding-mode theory

不过,随着半导体芯片技术以及数字信号处理技术的不断发展,通过在数字伺服 DSP 芯片中进行编程是一种有效的方法。在资源的开销上,新型伺服控制器比传统的控制器需要使用更多的 DSP 寄存器,以及相对较多的运算步骤用于内外环控制器的差分单元和 sgn 比较器运算。以 OpArt Microsystems 公司提供的解决方案为例,共有 128 个 24 bit 的 DSP 通用寄存器,而其用于传统的 DVD 伺服控制的聚焦和循轨均衡器参数设置共占用了其中的 18 个寄存器。所以相对而言在获得较优的伺服性能的同时,新型控制器所需的资源开销也是可以得到满足的。

## 5 结 论

引入滑模变结构控制理论,通过对受控对象建模,设计内外环的滑模趋近律和切换面,内外环控制器联合作用,控制光学头迅速跟踪指令。得到如下结论:

## 4.2 实施方法与讨论

与经典的光存储伺服控制器不同的是,本文提出的新型控制器结构更加复杂。具体在离散数字伺服中的流程如图 7 所示,其中 D 为差分单元。

很显然,在带来更快的响应速度和更优的稳定性的同时,与传统的直接反馈控制等方法相比,该控制器在结构上要复杂一些。尤其是核心部分:内环控制器和外环控制器共需要 3 个差分器和 2 个用于滑模趋近律的 sgn 比较器,这是和传统伺服控制器有所不同的;而文献[16]中使用的离散数字伺服控制器,只需用二阶系统即可完成普通 DVD 聚焦伺服动作。如果是和模拟伺服相比较,二者之间对资源开销的需求则相差更多。所以传统的光存储伺服一般采用直接的经典控制。

1) 通过内外环控制器的设计,将光存储伺服控制分为电信号控制速度信号和速度信号“控制”位置信号两部分。优点在于引入更为先进的控制器,结构清晰;

2) 仿真表明,与传统伺服控制方法相比,所设计的控制器响应速度较快。而所设计的滑模趋近律的优点在于能迅速收敛于滑动模态,且到达稳定状态时的速度较小,带来的超调量较小,这在仿真结果中也得到体现;

3) 从具体的控制器结构上看,相较于传统的伺服控制器,本文提出的新型伺服控制器采用内外环控制相结合的方式,结构上更加复杂,也占用更多的系统资源。总体而言,在离散数字伺服控制器 DSP 编程中,在增加有限的资源开销条件下,新型伺服控制器更能满足 NVD 系统关于伺服快速性、系统稳定性的要求。

## 参 考 文 献

- 1 Li Jinyan, Ruan Hao, Gan Fuxi. Calculation and analysis of

- multi-layers for the read only super-resolution optical disks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):366~370  
李进延,阮 昊,干福熹. 只读式超分辨光盘的膜层设计和分析[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):366~370
- 2 Tang Yi, Pei Jing, Pan Longfa *et al.*. Adaptive level detection for multi-level optical disk using signal waveform modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4):1130~1134  
唐 毅,裴 京,潘龙法等. 波形调制多阶光盘的自适应阶次检测[J]. 光学学报, 2010, **30**(4):1130~1134
- 3 Shen Zhaolong, Jiang Bing, Cai Jianwen *et al.*. Synchronizing focus error detection of dual-pickup in multi-layer data storage system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):685~689  
沈兆龙,江 兵,蔡建文等. 双光头多层数据存储系统同步聚焦误差检测[J]. 光学学报, 2007, **27**(4):685~689
- 4 Chen Lu, Xu Wendong, Zhu Qing. A novel focus servo module in hybrid magneto-optical recording testing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1341~1346  
陈 璐,徐文东,朱 青. 光磁混合存储动态测试系统中的聚焦伺服模块研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(5):1341~1346
- 5 Gao Xiumin, Xu Wendong, Zhou Fei *et al.*. Modularized static tester for blue ray optical recording properties [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1127~1131  
高秀敏,徐文东,周 飞等. 模块化蓝光光存储性能静态测试系统[J]. 中国激光, 2005, **32**(8):1127~1131
- 6 Shin-ichi Ohkoshi, Yoshihide Tsunobuchi, Tomoyuki Matsuda *et al.*. Synthesis of a metal oxide with a room-temperature photo-reversible phase transition [J]. *Nature Chemistry*, 2010, **2**(7):539~545
- 7 Jin Guofan, Zhang Peikun. Trends in research on super-high density storage [J]. *J. China Jiliang University*, 2001, **12**(2):6~12  
金国藩,张培琨. 超高密度光存储技术的现状和今后的发展[J]. 中国计量学院学报, 2001, **12**(2):6~12
- 8 Amir H. Chaghajardi. Sensing and control in optical drives how to read data from a clear disc [J]. *Control Systems Magazine*, 2008, **28**(3):23~29
- 9 Chen Weiliang, Zhang Yifang. The automatic parameter design for focusing controller on optical disk drives [J]. *J. Sci. Eng. Technol.*, 2005, **1**(2):47~56  
陈韦良,张义芳. 光碟机聚焦控制器参数设计之自动化[J]. 科学与工程技术期刊, 2005, **1**(2):47~56
- 10 Standard ECMA-267. 120 mm DVD-read-only disk [S]. Europe: ECMA General Assembly, 2001. 18~20
- 11 Hou Lisong. A practicable solution for red-HD storage—NVD [J]. *Video Engineering*, 2008, **32**(2):52~53  
侯立松. NVD:切实可行的红光高清存储之路[J]. 电视技术, 2008, **32**(2):52~53
- 12 Chen Chongming, Chen Xianzhen. Adaptive Focusing Control of DVD Drive System [D]. Taipei: Central University, 2002. 22~29  
陈重铭,陈显祯. DVD光碟机之适应性聚焦控制[D]. 台北:中央大学, 2002. 22~29
- 13 Zhao Zhijie, Lü Yousheng. Application of Iterative Learning Control to DVD Tracking Servo System [D]. Yunlin: Yunlin University of Science & Technology, 2003. 23~31  
赵致杰,吕有胜. 反复学习控制于光碟机循轨伺服系统之应用[D]. 云林:云林科技大学, 2003. 23~31
- 14 Gao Weibing. Foundation of Variable Structure Control Theory [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990. 262~274  
高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科技出版社, 1990. 262~274
- 15 Liu Jinkun. MATLAB Simulation for Sliding Mode Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 14~43  
刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 14~43
- 16 Xu Duanyi. High Density Optical Data Storage [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 131~140  
徐端颐. 高密度光盘数据存储[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 131~140