

特定函数—大角度中性变密度盘的研制

吴宝申 杨树梅 卫丕昌

摘要 特定函数-大角度中性变密度盘是一种新型的大动态范围的星仿真器件。它能将宇宙中星体微弱的光强模拟出来,并标定天空背景特性;它在一些重要领域有广泛的应用。研制过程中我们设计具有独创性的遮蔽机构在 $0^\circ\sim 330^\circ$ 的基片上使得光密度呈连续非线性变化,最大光密度274倍,最小光密度为0.01,使用波段 $(0.4\sim 1.1)\mu\text{m}$,且中性好,光密度随基片角度分布非线性度大。

关键词:中性变密度盘;星光仿真

一、前 言

特定函数—大角度中性变密度盘是星光仿真器中的能量仿真器件,它是光密度随着圆形基片的角度(330° 或大于 330°)按特定函数($D_x = \log(E_{n,1}/A \cdot E_x)$, D_x —星等级为 M_x 的光度, $E_{n,1}$ 和 E_x 分别为星等是 $M_{n,1}$, M_x 时恒星辐射能量, A 为特定变量)连续变化的中性滤光片。

在星光制导的星光仿真器中,特定函数—大角度中性变密度盘是重要的核心器件,具有十分重要的作用。它不仅可用来作能量的校准和补偿,而且,在实验室里或宇宙空间中还可用来模拟恒星能量或天空背景等某些特性。

美国曾发表有关具有非线性密度分布的中性密度滤光片的报导^[1],其密度是沿半径(14mm范围内)非线性分布,即径向变密度,密度最大是最小的5.3倍。

美国的星模拟器设计中,在其准直光管系统中各有二片(0.62—1)微米中性密度圆光楔(但没有给出特殊设计说明),模拟器的星等,即准直光管的视星等由表达式:

$$M_x = -2.5 \log \frac{SH_c(\lambda)RS(\lambda)d\lambda}{SHA_o\gamma(\lambda)R_s(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

所描述, $H_c(\lambda)$ 为每单位波长范围的准直光管的辐射, $R_s(\lambda)$ 为敏感器的相对光谱响应, $HA_o\gamma(\lambda)$ 为 $A_o\gamma$ 星的辐射。

美国还报导(在1986年和1987年)在星光模拟器中用等密度衰减片模拟星能量,国内变密度盘经常使用在 $(0.4\sim 0.7)\mu\text{m}$ 范围中,光密度由1.94连续变化到0.01,或由0.83连续变化到0.01,即在大多数光学仪器中使用的变密度盘所要求改变光密度范围小,最大光密度是最小光密度的83—194倍,在 300° (通常小于 270°)的基片的角度范围内,光密度(D)是按 $\log(1/T)$ (T 为透射率)分布的,其随基片角度变化的非线性度小而近似为线性,分布如图1中所示

我们研制的特定函数—大角度中性变密度盘与上述情况不同,在有波长标记的时候,它能真实地使某波长能量等于恒星在该波长辐射的能量,并且 $\lambda_1 = 0.4\mu\text{m}$ 至 $\lambda_2 = 1.1\mu\text{m}$ 范围内使

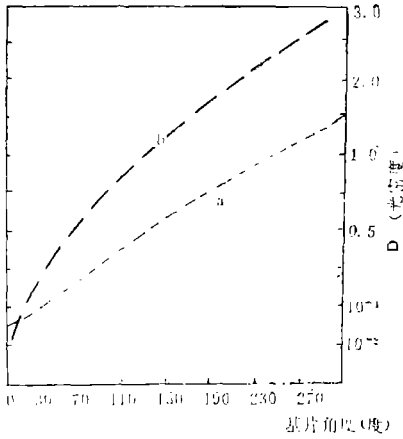


图1 不同变密度的光密度分布曲线

- (a) — 常用变密度盘光密度曲线;
- (b) — 我们研制基片角度(度)的特定函数一大角度变密度盘的光密度分布曲线

仿真能量满足恒星在 λ_1 至 λ_2 辐射能量 (E) 的分布方程:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E \lambda(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

(单位为 W/cm^2)

我们研制的特定函数——大角度变密度盘还具有下述特征:

- (1) 使用波段宽, 0.4 至 $1.1\mu m$;
- (2) 光密度变化大, 最大光密度是最小光密度的274倍之多,
- (3) 在基片上变密度的角度大, 大于或等于 330 度,
- (4) 光密度 (Dx) 是特殊二次幂的对数函数,
- (5) 光密度分布非线性度大。即在 0 至 330 度的圆形基片上, 光密度 $Dx = \ln E 0.1/AEx$ 连续变化, 具有双曲线特性如图1中的曲线(b)所示, 光密度从 0.01 变化到 $0-4$, 且线性度大, 国内

内外其他同类性能器件未见报导。因此, 薄膜设计和制造难度较大。

二、薄膜设计

按设计要求, 在 360° 的圆形基片上工作角度为 330° , 即在 $0^\circ-330^\circ$ 之间。光密度连续改变既要符合方程(2)的规律, 又要满足星等 (Mx) 与恒星辐射能量 (Ex) 的关系。

$$Mx = -2.5 \log Ex \quad (2)$$

式中 Ex 为星等是 Mx 时恒星辐射能量, x 从 0 到 7 之间变化。

图2给出了总体对该变密度的设计要求。纵座标为星等 (Mx) 和基片角度, 横座标为密度盘 $0^\circ \sim 330^\circ$ 角度范围内透射率值。总体设计要求误差在 $\pm 3\%$ 以内。

按着中性变密度盘设计原理, 首先考虑了符合上述要求的金属材料的选择, 在使用波段范围内具有较好的中性, 牢固性好, 具有适合的折射率和消光系数。

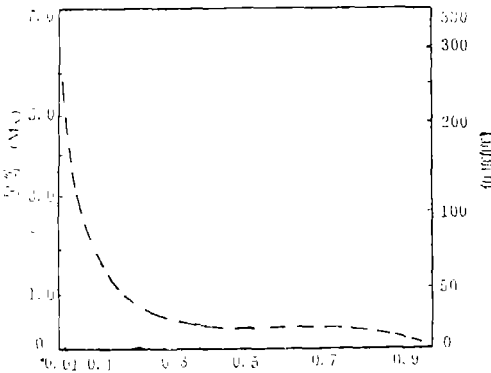


图2 特定函数一大角度中性变密度的总体设计要求曲线

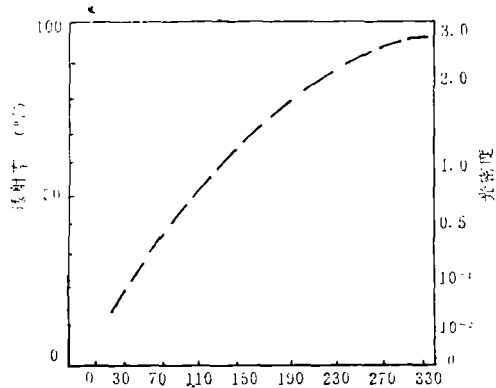


图3 特定函数一大角度中性变密度盘光密度理论设计曲线

基片使用角度 $0^\circ-330^\circ$ ，在任意角度时，满足 $\theta = 5/x - 11$ ，同时考虑星等 (M_x) 和恒星辐射能量 (E_x) 及变密度的光密度 (D_x) 满足如下式：

$$D_x = \log(E_{0.1}/AE_x) \quad (3)$$

$E_{0.1}$ 为星等是 $M_{0.1}-0.1$ 时的辐射能量。此时变密度盘的光密度为 0.03。

光密度理论设计曲线如图 3 所示。图中曲线相应于横座标为 $0-330^\circ$ 之间基片角度范围内，光密度按方程 (3) 的分布。非线性大，光密度值变化大，最大光密度值是最小光密度值的 274 倍，所有误差在总体要求范围内，满足设计要求。

三、制备与结果

在光电—膜厚监控系统中，设计了新的比较片机构，在真空镀膜机的钟罩内设计了一套特殊的遮蔽机构，在金属膜连续蒸涂过程中，能控制到被镀基片上 0° 至 330° 的各角度的气流沉积密度和暴露时间，以达到所设计的光密度。此种机构与镀制常用变密盘的拉链式遮蔽机构和制造圆形可变光片的遮蔽机构不同。在转动轴上装有基片和连动的双叶片，它们同时以 v_1, v_2 和 v_3 的转速作相对运动如图 4 示，并且转动的速度比为 $(v_2-v_1)/(v_3-v_1) = \text{特定值}$ 。连动的两叶片有特殊的设计形状。

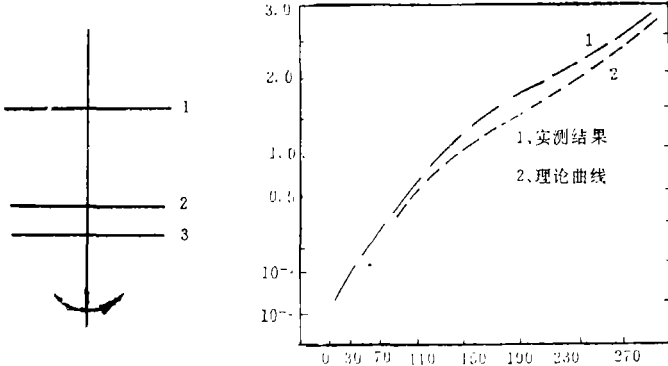


图 4 遮蔽机构示意图

- 1—被镀基片，转速为 v_1 ；
- 2—连动叶片，转速为 v_2 ；
- 3—转动叶片，转速为 v_3 。

这种新遮蔽机构具有工作周期可变和转速可调等优点，操作方便。

图 5 给出我们研制的特定函数——大角度中性变密度盘。可以看到光密度随基片角度呈连续且非线性变化的实测结果图 5 中曲线 1 所示，并同时给出理论设计结果图 5 中曲线 2 作比较，在低密度部分重合性好，高密度区虽不重合，但误差在总体要求范围 ($\pm 3\%$) 内，可满足设计和使用要求。

图 6 为变密度盘几种典型角度上光谱透射率的测量曲线 ($0.4-0.8\mu\text{m}$) 并与曲线 A (光学零件镀膜国家标准) 进行比较。说明我们研制的变密度盘的中性性能，无论在高密度区或低密度区的中性均达到或优于国家标准的指标。

在光学膜层的性能方面，由于我们在国内首先采用了电子枪蒸涂变密度盘的工艺，使

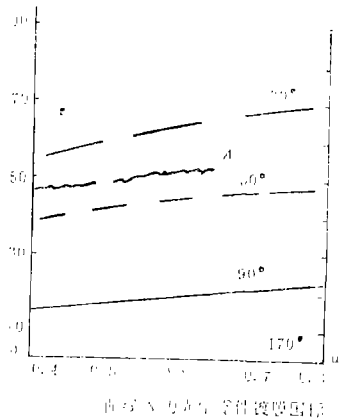


图 5 实测曲线

图 6 变密度盘几个典型角度上光谱透射率测量曲线

得被蒸发的金属原子以较大的动能附着在基片上。因此涂层致密，牢固性大大提高，光学性能好。我们研制的特定函数——大角度变密度盘与常用变密度盘，在一些较主要性能方面的区别列于表 1。

表 1

比较的项目 名称	光学密度 D 函数表示	密度分布	最大密度/ 最小密度	使用波段	基片上变密 角度	遮蔽机构的 特征	问世年代
常用变密度盘	$D = \log \frac{1}{T}$ T —透射率	近似线性 分布	83—191 (倍)	0.4—0.7 μm (可见区)	常用 $0^\circ \sim 270^\circ$	拉链式	50年代 初
特定函数—大 角度 中性变密度盘	$D_x = \log \frac{E_{0.1}}{AE_x}$ D_x —星等为 M_x 的 光密度 $E_{0.1}$ 和 E_x 为星等为 $M_{0.1}$ 和 M_x 时恒星 辐射能量 A 特定变 量	非线性度有 双曲线特征	274 (倍)	0.4—1.1 μm (可见区和 近红外区)	$0^\circ \sim 330^\circ$	具有任意周期的 非线性遮蔽机构	1987年 长光所提 出设计的

可以看到，特定函数——大角度变密度盘，在性能上有以下特点，同时也反映出在这一器件的设计和制备方面存在较大难度。

1. 使用波段宽 2. 光密度变化大，最大是最小光密度的274倍 3. 可变密度的角度范围大 4. 光密度 D_x 是特定函数，因此膜层光密度是具有二次幂的对数函数不易设计和模拟 5. 非线性大，不易制造，常规的非线性遮蔽机构不易设计蒸镀出不超差的金属涂层。由于采用了特殊的设计和特殊工艺，我们达到了设计要求，经两年使用膜层牢固性能良好，是新型特殊密度盘，具有国内首创。

参 考 文 献

- [1] Harold H. Bloem and William E. Goetz, Opt. Eng., 17, No. 4, 432, (1978)
- [2] Howard Herzig and Rodney S. Spencer, Appl. Opt., 12, No. 6, 113 (1973)
- [3] Raoliometrics, Inc., Huntsville, Ala.; Sci. and Tech. Aero. Rep., 24, No. 7—8, 1986 N86-19268

Investigation of Special-Function Large-Angular Neutral Variable Density Disk

Wu Baoshen, Yang Shumei and Wei Pichang

Abstract

The special-function large-angular neutral variable density disk is a new type of star simulator with large dynamical scale, which can simulate the intensity of weak star in the sky and

demarcate the characteristics of the universal background. It has been applied to some very important fields. During our investigation, we have designed a special shutter system, which made the light density continuously variable within the range of 0—330° on the substrate with the maximum of 274 times and minimum of 0.01. Its facility region is 0.4—1.1 μ m with better neutral density and the large nonlinearity distribution with the angular variation of the substrate.

Key words: Neutral Variable Density Disk, Star Simulator