

TM—3000A1太阳模拟器

赵吉林 仲跻功 陈 兴

摘要 本文介绍了TM—3000A1太阳模拟器的结构与原理，分析和计算了它的技术指标，给出了实测结果。

一、前 言

早期太阳模拟器作为空间环境模拟室的主要组成部分，用来对人造卫星在宇宙空间环境中的热平衡、卫星所带太阳电池的光—电转换、卫星表面和太阳电池在太阳光紫外辐照下的性能衰降等项进行模拟实验研究。近年来随着科学技术的发展，太阳模拟器已被广泛应用。例如，在空间技术中卫星姿态控制用的太阳角计的标定，卫星表面涂层等材料的光谱反射率和发射率的测试，在遥感技术中地物等目标的光谱辐射特性的测试及有关测试仪器的校对，在太阳能利用中某些材料、元件有关特性的检测，农业上改变和控制农作物光照条件的某些实验等项工作中，太阳模拟器都是必要的设备。

TM—3000A1是一个通用的准直型太阳模拟器，主要用于上述有关工作中某些材料、元件、器件的测试与标定。由于它具有较高的技术指标，特别适用于大面积太阳电池阵列的测试。

二、结构与原理

(一)、光学系统

TM—3000A1太阳模拟器的光学系统如图1所示，由光源（三千瓦氙灯）、椭球面聚光镜、平面反射镜、折射式光学积分器、准直透镜等组成。

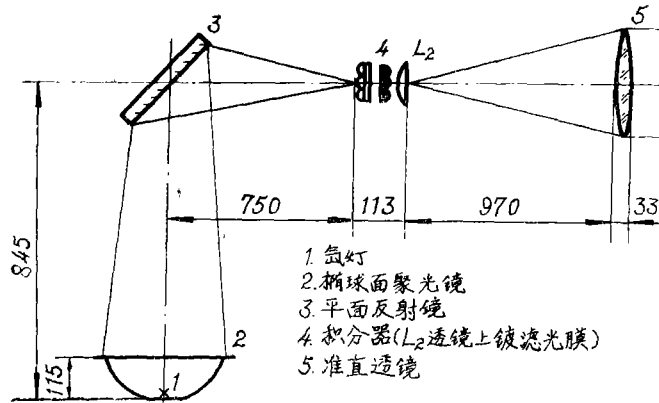


图1 TM—3000A1的光学系统

短弧氙灯由于它在光度上和光谱分布的特性而成为适宜的太阳模拟器光源。椭球面聚光镜充分会聚氙弧发出的辐射通量,在它的第二焦面内(即积分器入射端——场镜组)形成一个辐照分布,光学设计上保证积分器通光口径内集中足够的辐射通量而其分布梯度(辐照度变化)又较为平缓。

为保证被照面上辐照度的均匀分布,引用了光学积分器。通常积分器由场镜组、投影镜组组成。在 $TM-3000A1$ 中,场镜组、投影镜组分别由通光口径相同的多个小元素透镜按中心对称方式排列组成。场镜组的每一个元素分别与投影镜组的对应元素同光轴,构成一个光通道。实质上折射式光学积分器是一个并列多光通道系统,各并列光通道的光轴在系统主光轴上有一个共同交点。在图2中,场镜元素位于投影镜元素的焦面上,场镜各元素经其对应的投影镜元素和透镜 L_2 成像后将叠加在 L_2 的焦面 $A'A'$ 处。反之,聚光镜出瞳 PP 经透镜 L_1 和场镜各元素分别成多个像于投影镜的各元素透镜口径内。在 $TM-3000A1$ 中,省略了透镜 L_1 ,而且场镜组、投影镜组的各个元素透镜光学尺寸相同。场镜各元素透镜口径范围内的辐照分布梯度比场镜组整个口径范围内辐照分布梯度小得多。而且在积分器叠加成像过程中,对系统主光轴而言对称排列的场镜组元素透镜口径内的辐照分布梯度将互相补偿,从而保证了被照面 $A'A'$ 内辐照度分布均匀化。经准直透镜后该均匀被照面成像在相应位置上,由均匀被照面的位置要求确定透镜 L_2 的焦距。

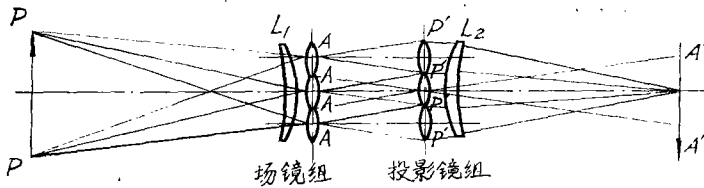


图2 折射式光学积分器光路示意图

积分器投影镜组位于准直透镜焦面内,因此准直透镜发出准直光束,从而模拟了太阳的遥远距离并保证了被光线照射的空间沿光轴方向上一定范围内的辐照均匀分布。

在 $TM-3000A1$ 中,均匀被照面为正六边形,其外接圆直径 $D_0 = 250$ 毫米,到准直透镜距离为 745 毫米。积分器通光口径 $2R = 52.4$ 毫米(图3),准直系统焦距 $F' = 1000$ 毫米,准直角 $U_0 = \pm 1.5^\circ$ 。椭球面聚光镜第一焦距 $f = 80$ 毫米,第二焦距 $f' = 1600$ 毫米, $U_0 = 28^\circ$, $U_m = 102^\circ$ (图4)。

积分器对氙灯垂轴方向上的弧飘有一定的补偿效果,增多其光通道数目有利于提高系统的均匀度和稳定度,但积分器元素透镜口径将相应减小,加工难度较大。 $TM-3000A1$ 积分器各石英玻璃元素透镜用光胶法排列固定在支承石英玻璃板上,各元素排列形式如图3所示。与通常借助于增加积分器光通道数目提高均匀度以及采用棒状正六面体两端加工成球面的元素组成积分器的多数小型太阳模拟器系统相比, $TM-3000A1$ 系统的积分器光学结构合理,节省石英玻璃,光能透过率较高,加工较简单。聚光镜会聚的辐射通量占氙弧发出的全部辐射通量的比例 K_0 。称之为聚光镜的聚光率,积分器口径接收到的辐射通量占聚光镜第二焦面内全部辐射通量的比例 K_1 。称之为积分器口径利用率;确定聚光镜光学参数和氙弧峰值亮度点到聚光镜第一焦点的轴向距离时要合理选取 K_0 和 K_1 值。

在聚光镜第二焦面内，积分器场镜组通光口径范围外近边缘处放置四片硅光电池，借助于它们的光电输出信号反馈控制氙灯电源的输出电流，保证被照面内的辐照稳定度。

按光学系统和使用要求确定机械结构，*TM-3000A1* 的机械结构由灯室、镜筒、底座三部分组成。在灯室内，聚光镜座和氙灯均有固定和调节升降、倾斜、平移机构；为严格保证氙弧正确工作位置，氙灯的各个方向调节应分别独立进行。清洁冷空气通入灯室内，风冷氙灯和灯室内的各光学件，氙弧紫外光辐照下产生的臭氧连同热空气通过风管由抽风机排出。积分器框外设有冷却水套，用作光控的四片硅光电池贴在冷却水套向着光的端面上。整个主机固定在底座上，底座下安有四个胶轮，便于主机的移动，胶轮外侧安四个千斤钉用来固定主机和调节系统光轴的俯仰与高低。

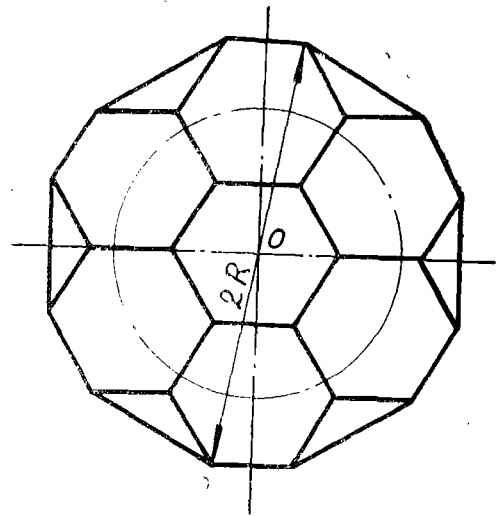


图3 *TM-3000A1*
积分器通光口径

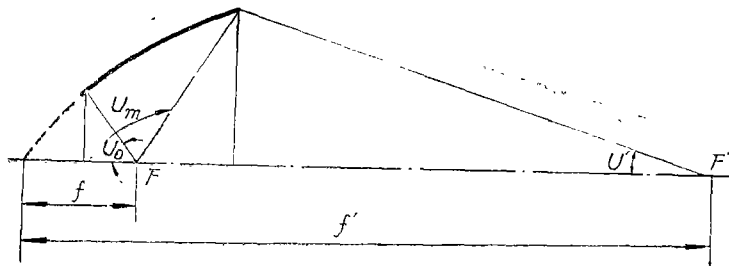


图4 椭球面聚光镜光学参数

(二) 氙灯电源及其控制系统

TM-3000A1 系统的氙灯电源及控制系统的方块原理电路如图5所示。电源为三相桥式半控整流电路，调节其输出功率可改变被照面内的辐照度。控制系统采用硅光电池作为光电反馈元件，自动控制和调节电源输出功率，从而获得较高的辐照稳定度。

主电路中，三相交流电源经变压器、三相半控桥式整流器、滤波器、触发器供给氙灯。

在控制电路中，标准信号减去硅光电池输出的光电信号之差送入放大器，经放大后与同步变压器输出的正弦波电压相叠加并送入移相触发器。叠加处的幅值因硅光电池输出信号的变化而改变，相应的脉冲相位也随之改变。脉冲相位的变化改变了可控硅导通角的大小，即功率的大小。如此，每当被照面辐照度变化时，借助于光控元件硅光电池输出信号变化自动调节被照面辐照度。从而保证了被照面上的辐照稳定度。建立被照面上辐照度与电源控制系统标准信号大小之间的对应关系，通过标准信号选定并随时监视被照面上的辐照度。

采用辐照度控制系统克服了定电流反馈控制系统对于氙弧闪动、光学系统透过率及氙灯光电转换效率降低等原因引起的辐照度变化无法控制的缺点，保证得到较高的辐照稳定度。辐照度变化可分为两部分，一是由于电网波动、光学系统透率及氙灯光电转换效率的衰减等原因造成的慢变化，二是氙弧闪动及来自电网的突然干扰等原因造成的瞬间抖动。控制电路

中放大倍率的选取应同时考虑这两种辐照度变化，如果选取适当，既可控制辐照度的慢变化又可抑制辐照度的瞬间抖动。在该系统中放大倍率定为450~500倍。

该电路中采用可控硅作为氙灯电源的控制元件，与用电抗器作为控制元件的氙灯电源相比较，它体积小、重量轻、效率高，而且时间常数小，随机控制精度好。其不足之处是非满负荷运用时电流纹波系数较大，但加滤波后可满足氙灯使用技术要求。也有人认为可控硅电源对电网有影响，但对该电源测量结果表明电网电压波形比原来的失真度只增加了不到1%，用同一电网的数字式电表及记录仪器仍正常工作。

TM-3000A1系统的电源技术指标为：额定直流输出30伏、100安培；电流控制范围20安培~100安培；输出功率在500~3000瓦范围内可连续调节；电流纹波系数在额定功率下为2%。

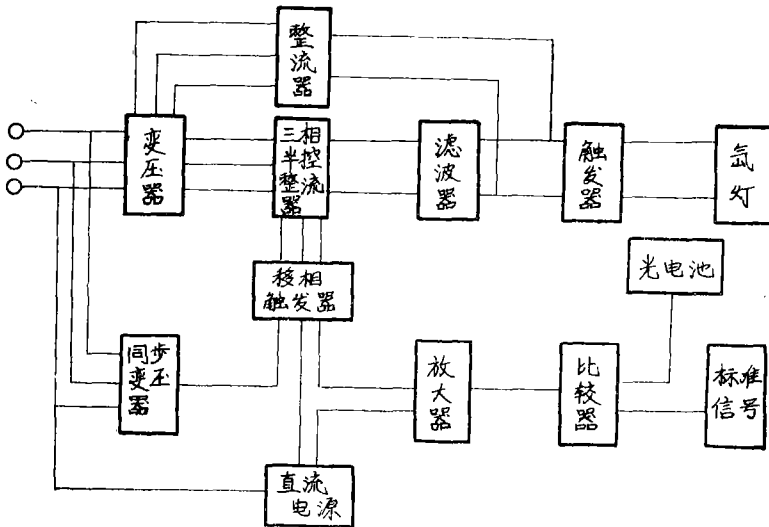


图5 TM-3000A1的电源方框图

三、总体技术指标的考虑与计算

辐照度、辐照均匀度、辐照稳定度、光谱分布等是太阳模拟器的主要技术指标。

聚光镜第二焦面内辐照度分布不仅是评价聚光镜光学设计、合理确定积分器光通道数目的依据，而且是计算系统理想均匀度和辐照度的重要数据。在考虑太阳模拟器技术指标时需要计算这一分布。计算这一分布有不同的方法^[1, 2]。这里只简述我们称之为逆光路环带法的基本思想^[2]和用于TM-3000A1系统的计算结果。

在系统几何光学参数确定后，由氙灯发光强度相对分布和法向亮度分布可计算出 K_c 、 K_1 ，进而计算出聚光镜第二焦面内辐照度分布。氙弧法向发光强度设为 I_0 ，任意 U 角方向上发光强度为 I ，则聚光镜的聚光率

$$K_c = \frac{2\pi \int_{U_0}^{U_m} t(u) \sin(u) du}{2\pi \int_0^{180^\circ} t(u) \sin(u) du}$$

式中 $t(u) = I/I_0$ ， U_0 、 U_m 见图4。在实际计算中聚光镜从 U_0 至 U_m 范围内按 U 角大小依

次被划分成若干个环带，氙弧发光强度分布 I 也按 U 角划分的环带测定，因此上式的积分用对环带求和代替。氙弧和聚光镜有关尺寸相比可看作为一个物理上的“点”。因此可以认为：位于聚光镜第一焦点上的氙弧亮度分布网格中各个基元发光面无像差地被椭球面聚光镜各个环带成像到第二焦面上，其成像倍率表示为

$$M_u = \frac{e^2 + 2e \cos(U) + 1}{e^2 - 1}$$

式中 e 是椭圆偏心率。对于给定的积分器口径可得到取决于聚光镜各环带倍率 M_u 的氙弧有效范围；第二焦面内辐照总分布是聚光镜各个环带形成的辐照分布相加的结果。基于以上几点可以计算出第二焦面内辐照总分布和积分器口径的利用率 K_1 。氙弧峰值亮度点到聚光镜第一焦点的轴向距离 ΔX 称之为离焦量，它的大小将影响 K_1 和第二焦面内辐照分布。TM-3000A1 的 ΔX 与 K_1 关系见表 1，在最佳离焦量时 TM-3000A1 聚光镜第二焦面内辐照度分布计算曲线如图 6。

表 1 TM-3000A1 的 ΔX 与 K_1

ΔX	0.99	1.48	1.97	2.47	2.96
K_1	0.500	0.566	0.565	0.559	0.533

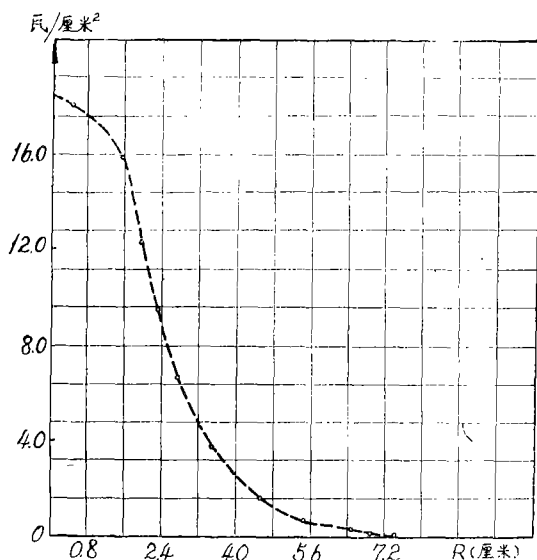


图 6 TM-3000A1 聚光镜第二焦面内辐照度分布计算曲线

$$P = P_1 \times (0.90)^4$$

上式中 P_0 为氙灯电功率； K_1 为氙灯光——电功率转换系数，可以实际测得也可由经验取 $K_1 = 0.33$ ； $K_c = 0.70$ ； $K_1 = 0.566$ ；金属基底的清洁光学镜面反射率取 0.85；石英透镜透过率取 0.90。这里计算出的 P 是均匀地分布在被照面内的。在大气光学质量为零的太阳光谱分布条件下，太阳光谱匹配滤光片的光谱积分透过率一般为 0.60。基于这些参数，在清洁光学件和各光学件反射（透过）率衰减 5% 两种情况下被照面内辐照度分别计算为 2.0 和 1.5 个太阳常数。

由聚光镜第二焦面内辐照分布和积分器元素数目可得到不计积分器和准直透镜像差影响的理想均匀度。在太阳模拟器中像差只影响被照面内有效均匀范围占被照面光学设计尺寸的相对比例，即被照面边缘不均匀范围的大小。在 TM-3000A1 系统中，采用了我们称之为边缘补偿的办法，通过增加被照面边缘辐照度改进整个被照面内的辐照均匀度。此外，由经验可知像 TM-3000A1 这样的折射准直型系统均匀度都可达到 $\pm 5\%$ 水平。加之采用边缘补偿法，可以保证均匀度好于 $\pm 5\%$ ，并能得到较大的有效均匀范围。

TM-3000A1 系统辐照度计算如下：落入积分器通光口径内的辐射通量

$$P_1 = P_0 \times K_1 \times K_c \times (0.85)^2 \times K_1$$

被照面内有效辐射通量

光-电反馈控制系统，实质上是一个氙灯电源-氙灯-太阳模拟器光学系统-被照面-硅光电池-氙灯电源的闭合光电稳定回路。辐照稳定度虽然主要与氙弧稳定性及氙灯电源输出电流稳定性有关，与光电池位置及片数也有关。从光学系统成像的观点出发，应采用多片光电池轴对称地放在与被照面共轭的通光截面内。

采用一个滤光膜系，滤掉氙弧光谱的0.8—1.0微米的峰值，便可得到大气光学质量为零条件下的太阳光谱分布。采用多个滤光片分别修正氙弧经光学系统后的光谱之不同波段，是进一步提高光谱匹配精度和得到不同大气光学质量条件下的太阳光谱分布^[3]的有效手段。

四、主要技术指标实测结果

被照面设计为一个外接圆直径 $D_0 = 250$ 毫米的正六边形，实测有效均匀范围为一个外接圆直径 $D = 225$ 毫米的正六边形，即有效均匀范围的径向尺寸为设计尺寸的90%。

用口径5毫米的硅光电池沿被照面六个特征方向扫描，测量辐照度相对分布(如图7)，硅光电池输出电信号由记录仪记录成连续曲线。得到六条测量曲线中的最大值 $I_{最大}$ 和最小值 $I_{最小}$ ，则被照面辐照均匀度表示为

$$\pm \frac{I_{最大} - I_{最小}}{I_{最大} + I_{最小}} \times 100\%$$

表2给出六条测量曲线上的最大、最小值和每条曲线对应的方向上辐照均匀度；整个被照面上的辐照均匀度为：

$$\pm \frac{237 - 226}{237 + 226} \times 100\% = \pm 2.4\%$$

换用不同的三千瓦氙灯，经反复测试均得到好于 $\pm 5\%$ 的均匀度，适当挑选氙灯并准确调节氙弧峰值亮度点工作位置可保证达到 $\pm 3\%$ 。图8为 $TM-3000A1$ 均匀度测量曲线。

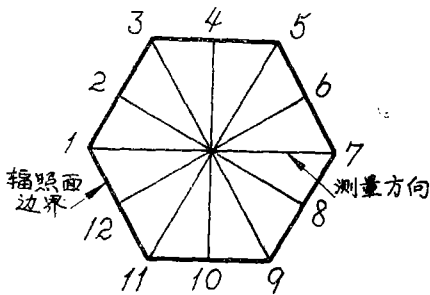


图7 均匀度测量方向示意图

表2 六个测量方向上的均匀度

方 向	7—1	2—8	9—3	4—10	5—11	12—6
I_{max}	234	235	236	237	237	236
I_{min}	226	226	226	226	226	226
均匀度 (%)	± 1.7	± 2.0	± 2.2	± 2.4	± 2.4	± 2.2

均匀度调试测量后，测量辐照度。考虑到系统光学件反射（透射）率衰减的影响，氙灯满功率时，在大气光学质量为零的太阳光谱分布条件下辐照度为1.5个太阳常数(0.203瓦/平方厘米)。

在被照面有效均匀范围内的任意位置上放一硅光电池，记录其光电输出信号随时间的变化，在规定时间间隔内输出信号最大值为 $F_{最大}$ 、最小值为 $F_{最小}$ ，则被照面该位置在这一规定时间间隔内辐照稳定度为

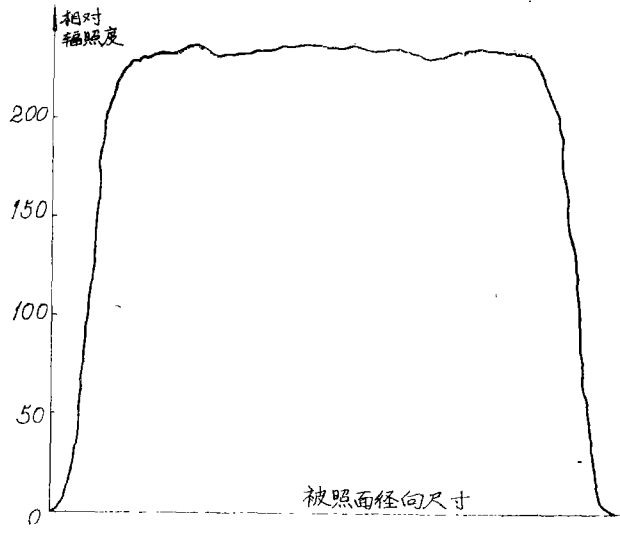


图8 *TM-3000A1*均匀度测量曲线

$$\text{均匀度} = \pm \frac{234 - 226}{234 + 226} \times 100\% = \pm 1.7\%$$

(1980.9.7)

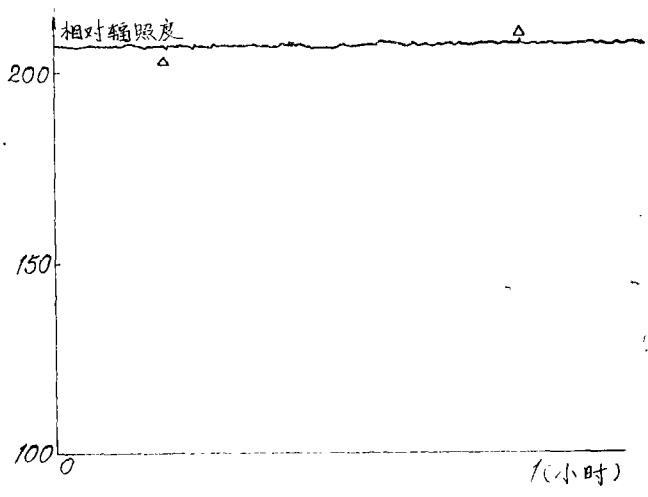


图9 *TM-3000A1*稳定度测量曲线

$$\text{稳定度} = \pm \frac{208.5 - 206}{208.5 + 206} \times 100\% = \pm 0.6\%$$

(1980.8.16)

$$\pm \frac{F_{\text{最大}} - F_{\text{最小}}}{F_{\text{最大}} + F_{\text{最小}}} \times 100\%$$

*TM-3000A1*太阳模拟器辐照稳定度好于±1%每小时，图9为它的典型测量曲线。

表3给出*TM-3000A1*被照面上光谱分布与大气光学质量为零时太阳光谱的匹配情况。

表 3

TM—3000A1 与太阳的光谱匹配 (大气光学质量为零的条件下)

光谱间隔 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$	$\lambda_1 (\mu m)$	0.35	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2
	$\lambda_2 (\mu m)$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
与太阳光谱偏差 (%)	1*滤光片	-27	-25	2	0	-15	8	28	-10	53	6	-15	4	4
	2*滤光片	-19	-9	1	0	-1	22	51	9	72	20	-4	18	11

中国科学院于一九八〇年九月组织并通过了对 TM—3000A1 的鉴定。认为该仪器性能测试数据可靠, 光学积分器结构和加工工艺有自己的特色, 它的研制成功填补了我国小型太阳模拟器的空白, 其性能达到了日本牛尾机电公司七十年代后期生产的同类仪器水平 (主要指标辐照均匀度超过了牛尾公司水平)。

参加 TM—3000A1 太阳模拟器研制工作的人员还有郎永志、王纪武、睦德成、杨秀荣、苟志玉、杨天功、史文科、陈喜堂、翟德荣、黄润、李文君、孙兰春、李子和、黄才良、周淑香等同志。

参 考 文 献

- [1] 杜温锡、李福田、周秀良, 光学械机, 1978, 4, 1页
- [2] 仲跻功, 光学械机, 1980, 2, 36页
- [3] EMI Electronics Limited. "Handbook of Remote Sensing Techniques" p118—119, January 1973.