



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114112325 A

(43) 申请公布日 2022. 03. 01

(21) 申请号 202111385799.7

(22) 申请日 2021.11.22

(71) 申请人 北京市遥感信息研究所

地址 100029 北京市朝阳区外馆斜街六号  
院

申请人 中国科学院合肥物质科学研究院

(72) 发明人 陈卓 周川杰 司孝龙 李幼平

张超 侯军燕 胡晓宁 裴玉东

李佳伟 徐伟伟

(74) 专利代理机构 中国兵器工业集团公司专利

中心 11011

代理人 王智红

(51) Int. Cl.

G01M 11/02 (2006.01)

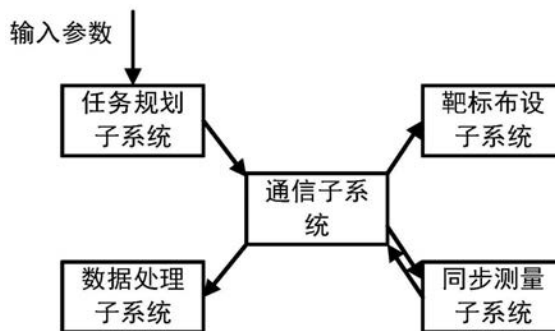
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统

(57) 摘要

本发明属于星载光学相机技术领域,提供一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统。包含任务规划子系统、靶标布设子系统、同步测量子系统、数据处理子系统和通信子系统;利用任务规划子系统根据卫星轨道计算靶标布设参数,由自动化高精度可调式三线靶标组成的靶标布设子系统根据靶标布设参数在卫星过境前开展靶标的自动化布设;同步测量子系统在卫星过境前后开展靶标反射率测量和大气环境参数测量;数据处理子系统根据卫星下传遥感图像以及同步测量子系统回传测量数据开展星载相机在轨MTF评价;各分系统之间控制指令和测量数据通过通信子系统进行传输。本发明通过高精度的机械化靶标布设及参数测量系统,可有效提升成像质量评价的准确度。



1. 自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,其特征在于,包括任务规划子系统、靶标布设子系统、同步测量子系统、数据处理子系统、通信子系统;

所述任务规划子系统根据卫星轨道参数、场地坐标信息、卫星过境时间区间这些输入参数计算布设参数:三线靶标组内距离、组间距离、布设角度和卫星过境精确时间;

所述靶标布设子系统,由逻辑控制箱、五组四黑三白条状黑白靶标、组间移动机构、组内移动机构和旋转调节转台组成,所述组间移动机构、组内移动机构由电机-减速-丝杠装置组成,旋转调节转台安装在组间移动机构与组内移动机构之间,导轨驱动实现四黑三白条状七条黑白靶标宽度精确可调,根据任务规划子系统输出布设参数进行沿轨靶标和垂轨靶标两列的位置和角度调整,五组靶标的间距可调;逻辑控制箱将输入的布设参数转换为控制信号驱动各调节机构展开运动;

所述同步测量子系统由大面积均匀靶标、地物光谱测量装置、大气测量装置、控制装置组成,所述大面积均匀靶标与靶标布设子系统的黑白条状靶标表面发射率相同,实现卫星过顶时刻靶标表面反射率的获取;控制装置用于接收过境时刻,并使能各测量设备开始测量;

所述数据处理子系统,其具备测量参数预处理、遥感图像靶标区域提取和在轨MTF计算功能;数据处理子系统的处理流程,除同步测量子系统获取测量数据外,还需输入靶标遥感图像,根据傅里叶光学成像原理,被评价光学相机的对比度传递函数CTF可表示为像方调制度与物方调制度的比值,通过CTF与MTF之间的关系由CTF推算MTF;

所述通信子系统采用常规的无线网络通信系统实现,通过无线传输网络,实现各子系统之间的数据交互;

所述任务规划子系统计算出的布设参数通过通信子系统发送至靶标布设子系统和同步测量子系统,靶标布设子系统根据参数进行三线靶标组间和组内相对位置和角度的自动调整,同步测量子系统根据卫星过顶时间定时获取靶标反射率、太阳直射辐射等地面数据并通过通信子系统发送至数据处理子系统,数据处理子系统结合地面数据和卫星遥感图像进行成像质量评价。

2. 根据如权利要求1所述的自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,其特征在于,所述条状黑白靶标为刚性耐腐金属材料薄片,表面为光谱平坦的近似朗伯性光学涂层,400nm~950nm波段范围内光谱反射率差异优于5%,表面平整度优于1mm/m。

3. 根据如权利要求1所述的自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,其特征在于,所述旋转调节转台安装有GPS测站,根据布设参数、沿轨或垂轨靶标布设角度控制旋转角度,能够实现靶标实际布设角度与预期值误差不大于 $0.1^{\circ}$ 。

4. 根据如权利要求1所述的自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,其特征在于,能够通过多组三线靶标联合解算自动匹配的方式适应不同分辨率卫星相机的在轨MTF检测。

5. 根据如权利要求1所述的自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,其特征在于,所述由CTF推算MTF过程如下:

像方调制度根据试验观测所获取的参照靶标反射率及布设场区的气象数据来求得,满足以下关系:

$$M_{\text{物}} = \frac{t(L_{0,h} - L_{0,l})}{2(L_a + L_{a-g}) + t(L_{0,h} + L_{0,l})}$$

其中,  $t$  为靶标-传感器路径的大气透过率,  $L_a$  是大气固有辐射、 $L_{a-g}$  是地-气耦合辐射、 $L_{0,h}$ 、 $L_{0,l}$  分别是黑白靶标的辐亮度;  $L_a$ 、 $L_{a-g}$  根据大气测量装置数据处理得到,  $L_{0,h}$ 、 $L_{0,l}$  根据地物光谱测量装置数据处理得到;

物方调制度通过直接读取大面积靶标遥感图像数据来计算得到, 满足以下关系:

$$M_{\text{物}} = \frac{DN_{\text{bar},h} - DN_{\text{bar},l}}{DN_{\text{bar},h} + DN_{\text{bar},l}}$$

其中,  $DN_{\text{bar},h}$  与  $DN_{\text{bar},l}$  是大面积黑白靶标扣除暗电流后的高低响应值;

像方调制度通过选择周期黑白靶标遥感影像中对比度最大的一组靶标后, 对靶标中心的有效亮暗靶标响应值进行统计平均得到, 满足以下关系:

$$M_{\text{像}} = \frac{DN_{\text{large},h} - DN_{\text{large},l}}{DN_{\text{large},h} + DN_{\text{large},l}}$$

其中,  $DN_{\text{large},h}$  与  $DN_{\text{large},l}$  是周期黑白靶标扣除暗电流后的高低响应值;

利用光学成像系统对其响应的像方调制度与物方调制度之比, 并对零频率值进行归一化可得, 得到系统对比度传递函数CTF

$$CTF = M_{\text{物}} / M_{\text{像}}$$

在获取物方及像方调制度后, 根据CTF与MTF的关系可得光学卫星传感器在奈奎斯特频率处MTF值, 进而利用参数化MTF模型可得到全频率的MTF曲线如下

$$MTF(0.5) \approx \frac{\pi}{4} CTF(0.5) = \frac{\pi}{4} M_{\text{物}} / M_{\text{像}}。$$

## 一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于星载光学相机技术领域,具体涉及一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统。

### 背景技术

[0002] 在轨调制传递函数(MTF)反映了成像系统对不同空间频率信号的响应能力,是评价遥感卫星的星载光学相机性能的重要指标。卫星在发射前,通常会在实验室内的模拟空间环境下对相机MTF进行系统性测量,但由于在轨运行过程中受卫星平台振动、空间环境变化以及大气等因素影响,星载光学相机实际在轨所表现出的成像质量往往会发生一定的变化。为更好地摸底遥感卫星的在轨工作状态,需在卫星稳定运行后,对星载相机的在轨MTF进行测量。

[0003] 三线靶标法是目前星载相机在轨MTF测量中较为常用的办法,通过外场试验布设三线靶标和大面积的同材质均匀靶标,一方面利用三线靶标的遥感图像获取像方调制度,另一方面通过地面同步测量均匀靶标反射率获取物方调制度,进而计算得到星载相机的在轨MTF,其数据处理过程简单,测量稳定度高。中低分辨率星载相机在利用三线靶标测量在轨MTF时,靶标多采用黑白条状软基靶标拼接而成,布设时需熟练测量人员按照卫星成像飞行方向、地面像元分辨率(GSD)等成像参数进行精确摆放。而对于亚米级高分辨率星载相机,分辨率的提升会导致成像系统对布设误差更敏感。采用人工布设方法,受操作熟练度、气候、靶标材质、布设方法等因素影响,存在0.5至1.5像元左右的布设误差,导致遥感图像中三线靶标黑白靶条无法区分,进而影响在轨MTF的测量精度。同时,三线靶标法需在卫星过顶时,同步利用光谱仪获取靶标反射率,现有方法自动化程度不高,测量效率较低,且外场试验所需的时间、人力成本往往较高。

[0004] 因此,亟需一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,以实现在轨MTF的自动化、高精度测量,进而实现高分辨率星载相机的成像质量评价。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统,解决传统三线靶标法在轨MTF测量人工布设精度控制难度大、耗费人力物力多的技术问题。

[0006] 为达到上述目的解决上述技术问题本发明的采取的技术方案如下:包括任务规划子系统、靶标布设子系统、同步测量子系统、数据处理子系统、通信子系统;

[0007] 任务规划子系统任务规划子系统根据卫星轨道参数、场地坐标信息、卫星过境时间区间这些输入参数计算布设参数:三线靶标组内距离、组间距离、布设角度和卫星过境精确时间;

[0008] 靶标布设子系统,由逻辑控制箱、五组条状黑白靶标302、组间移动机构202、组内移动机构301和旋转调节转台303组成,条状黑白靶标302由四黑三白的条状201构成,根据任务规划子系统输出布设参数进行沿轨靶标和垂轨靶标两列的位置和角度调整。

[0009] 同步测量子系统由大面积均匀靶标、地物光谱测量装置、大气测量装置、控制装置组成,大面积均匀靶标与靶标布设子系统的黑白条状靶标表面发射率相同,实现卫星过顶时刻靶标表面反射率的获取;控制装置用于接收过境时刻,并使能各测量设备开始测量;

[0010] 数据处理子系统,其具备测量参数预处理、遥感图像靶标区域提取和在轨MTF计算功能;数据处理子系统的处理流程,除同步测量子系统获取测量数据外,还需输入靶标遥感图像,根据傅里叶光学成像原理,被评价光学相机的对比度传递函数CTF可表示为像方调制度与物方调制度的比值,通过CTF与MTF之间的关系由CTF推算MTF;

[0011] 通信子系统采用常规的无线网络通信系统实现,通过无线传输网络,实现各子系统之间的数据交互;

[0012] 任务规划子系统设计出的布设参数通过通信子系统发送至靶标布设子系统和同步测量子系统,靶标布设子系统根据参数进行三线靶标组间和组内相对位置和角度的自动调整,同步测量子系统根据卫星过顶时间定时获取靶标反射率、太阳直射辐射等地面数据并通过通信子系统发送至数据处理子系统,数据处理子系统结合地面数据和卫星遥感图像进行成像质量评价。

[0013] 和现有技术相比,本发明技术方案带来的有益效果

[0014] 1、利用本发明所设计的成像质量评价系统,通过高精度的机械化靶标布设及参数测量系统,可有效提升成像质量评价的准确度。

[0015] 2、全链路自动化的设计方案可实现光学卫星在轨测试外场试验的无人化值守,无需大量人力物力,降低了试验成本,具有一定的经济价值。

## 附图说明

[0016] 图1为本发明在轨MTF评价系统组成框图;

[0017] 图2为本发明靶标布设子系统的示意图;

[0018] 图3为本发明靶标布设子系统中垂轨方向单组靶标工作示意图;

[0019] 图4为本发明垂轨方向单组靶标工作示意图;

[0020] 图5为本发明同步测量子系统的组成框图;

[0021] 图6为本发明数据处理子系统处理流程图;

[0022] 其中,201-单组靶标,202-组间调节机构,301-组内调节机构,302-条状黑白靶标,303-旋转调节转台。

## 具体实施方式

[0023] 本发明所涉及的系统包含任务规划子系统、靶标布设子系统、同步测量子系统、数据处理子系统和通信子系统;利用任务规划子系统根据卫星轨道计算靶标布设参数,由自动化高精度可调式三线靶标组成的靶标布设子系统根据靶标布设参数在卫星过境前开展靶标的自动化布设;同步测量子系统在卫星过境前后开展靶标反射率测量和大气环境参数测量;数据处理子系统根据卫星下传遥感图像以及同步测量子系统回传测量数据开展星载相机在轨MTF评价;各分系统之间控制指令和测量数据通过通信子系统进行传输。下面结合附图对本发明的实现过程进行详细的解释和说明。

[0024] 本发明的自动化高分辨星载相机在轨MTF评价系统包括:任务规划子系统、靶标布

设子系统、同步测量子系统、数据处理子系统、通信子系统,如图1所示。

[0025] 任务规划子系统根据卫星轨道参数、场地坐标信息、卫星过境时间区间等输入参数计算得到三线靶标组内距离、组间距离、布设角度和卫星过境精确时间等布设参数,通过通信子系统发送至靶标布设子系统和同步测量子系统,靶标布设子系统根据参数进行三线靶标组间和组内相对位置和角度的自动调整,同步测量子系统根据卫星过顶时间定时获取靶标反射率、太阳直射辐射等地面数据并通过通信子系统发送至数据处理子系统,数据处理子系统结合地面数据和卫星遥感图像进行成像质量评价。

[0026] 任务规划子系统根据卫星轨道参数、场地坐标信息、试验拟开展时间段(单位精确到天,例如20XX年X月X日)等输入参数计算得到沿轨/垂轨组内距离、沿轨/垂轨组间距离、沿轨/垂轨靶标布设角度和卫星过境精确时刻等布设参数。

[0027] 其中沿轨组内距离等于星载相机过境时刻的沿轨方向地面像元分辨率(单位米),垂轨组内距离等于星载相机过境时刻的垂轨方向地面像元分辨率(单位米),沿轨组间距离等于 $n+0.2$ ( $n$ 是为靶标组编号)Pixel(Pixel为星载相机过境时刻的沿轨方向地面像元分辨率,单位米),垂轨组间距离等于 $n+0.2$ ( $n$ 是为靶标组编号)Pixel(Pixel为星载相机过境时刻的垂轨方向地面像元分辨率,单位米),沿轨靶标布设角度等于星载星际过境时刻成像方向角(单位度),垂轨靶标布设角度等于星载星际过境时刻成像方向角的余角(单位度),卫星过境精确时刻单位精度到秒(例如20XX年X月X日XX时XX分XX秒)。

[0028] 靶标布设子系统,由逻辑控制箱、五组条状黑白靶标302、组间移动机构202、组内移动机构301和旋转调节转台303组成,条状黑白靶标302由四黑三白的条状201构成,根据任务规划子系统输出布设参数进行沿轨靶标和垂轨靶标两列的位置和角度调整。

[0029] 基于如下原因将靶标组数设计为五组:因为利用三线法开展在轨MTF评价时,地面靶标条纹需与星载相机传感器探测仪的采样网格完全对齐,即保持两者之间的采样相位为0。因此需要布设多组三线靶标来降低采样相位影响,以提高MTF检测精度。本发明垂轨和沿轨各设置五组靶标,组内相邻黑白靶标组内距离控制为 $n+0.2$ ( $n$ 是为靶标组数)Pixel(Pixel为星载相机的地面像元分辨率),以减小背景辐射及靶标相互之间的影响,此时每组三线靶标之间的相对相位差为 $0.2$ Pixel,可将相位差造成的影响控制在5%内。

[0030] 基于如下原因将条状黑白靶标302设计为四黑三白:条状黑白靶标302由四黑三白的条状201构成,因为理想条件下,布设无限长周期的靶标进行在轨MTF测量可提高评价结果的精度,而实际开展试验时,无限长周期靶标不具备可实现性。根据历史试验数据和仿真分析,三线靶标即三个半周期(由三条白色靶标和四条黑色靶标组成)的方波靶标即可等效替代无限长周期方波靶标开展在轨MTF评价。

[0031] 其中,条状黑白靶标302的材质为刚性耐腐金属材料薄片,表面为光谱平坦的近似朗伯性光学涂层,400nm~950nm波段范围内光谱反射率差异优于5%,表面平整度优于1mm/m;组间移动机构202、组内移动机构301由电机-减速-丝杠装置组成,导轨驱动实现四黑三白条状七条黑白靶标宽度精确可调,五组靶标的间距可调,平面距离调整精度优于1mm。可通过多组三线靶标联合解算自动匹配的方式适应不同分辨率卫星相机的在轨MTF检测;旋转调节转台303安装在组间移动机构202与组内移动机构301之间,旋转调节转台303安装有GPS测站,根据布设参数-沿轨/垂轨靶标布设角度控制旋转角度,可实现靶标实际布设角度与预期值误差不大于 $0.1^\circ$ 。

[0032] 靶标布设子系统由逻辑控制箱、五组四黑三白条状黑白靶标201、组间移动机构202、组内移动机构301和旋转机构303组成,如图2、3所示。使用时,任务控制子系统通过通信子系统将布设参数输入至逻辑控制箱。布设参数包括沿轨靶标布设角度 $\alpha$ 、垂轨靶标布设角度 $90^\circ - \alpha$ 、沿轨组内距离 $d_p$ 、垂轨组内距离 $d_v$ 、以及沿轨/垂轨组间距离 $D_m$ 、 $D_n$ ,组间布设距离满足

$$[0033] \quad D_n = (n+0.25) d_v$$

$$[0034] \quad D_m = (m+0.25) d_p$$

[0035] 其中, $m$ 和 $n$ 分别为沿轨方向和垂轨方向的靶标组数, $m=1,2,3,4,5$ , $n=1,2,3,4,5$ 。

[0036] 逻辑控制箱将输入布设参数转换为控制信号驱动各调节机构运动,如图4所示,以垂轨方向为例进行靶标布设过程说明。

[0037] (1) 靶标布设前初始状态。单组靶标201包含4黑3白七条靶标302,不工作状态为聚拢叠放状态,靶标长边与组间调节机构202垂直安装,与正北方向的初始安装夹角为 $\alpha_0$ 。

[0038] (2) 靶标组内展开及旋转。接收到控制信号后,组内移动机构301驱动靶标302展开,保持黑白靶标302组内距离为 $d_v$ 。旋转调节转台303控制五组靶标201整体旋转 $\Delta\alpha$ , $\Delta\alpha$ 满足

$$[0039] \quad \Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$$

[0040] (3) 靶标组间展开。组间调节机构202分别驱动沿轨和垂轨五组靶标201沿轨道方向平移,进行组间展开,使各组组间布设距离满足 $D_m$ 、 $D_n$ ,各组平移距离 $D_{m1}$ 、 $D_{n1}$ 满足

$$[0041] \quad D_{m1} = D_m / \cos \Delta\alpha$$

$$[0042] \quad D_{n1} = D_n / \cos \Delta\alpha$$

[0043] 同步测量子系统由大面积均匀靶标、地物光谱测量装置、大气测量装置组成,如图5所示,其中大面积均匀靶标与靶标布设子系统的黑白条状靶标表面发射率相同,可实现卫星过顶时刻靶标表面反射率的获取。使用时,任务规划子系统通过通信子系统将卫星精确过境时刻发送至控制装置,控制装置根据过境时刻使能地物光谱测量装置和大气测量装置,地物光谱测量装置在过境时刻测量大面积均匀靶标表面辐亮度(过境时刻前20分钟开始,过境时刻后10分钟结束),大气测量装置同步进行大气环境参数测量(过境时刻前120分钟开始,过境时刻后60分钟结束)。试验结束后,测量数据通过通信子系统自动将测量数据传输至数据处理子系统。

[0044] 数据处理子系统,其具备测量参数预处理、遥感图像靶标区域提取和在轨MTF计算功能。数据处理子系统的处理流程,除同步测量子系统获取测量数据外,还需输入靶标遥感图像。

[0045] 根据傅里叶光学成像原理,被评价光学相机的对比度传递函数CTF可表示为像方调制度与物方调制度的比值,通过CTF与MTF之间的关系,可由CTF推算MTF。

[0046] 作为实施方法的一种方式,像方调制度可以根据试验观测所获取的参照靶标反射率及布设场区的气象数据(温度、湿度、压强、风力、能见度等)来求得,满足以下关系:

$$[0047] \quad M_{\text{物}} = \frac{t(L_{0,h} - L_{0,l})}{2(L_a + L_{a-g}) + t(L_{0,h} + L_{0,l})}$$

[0048] 其中, $t$ 为靶标-传感器路径的大气透过率, $L_a$ 是大气固有辐射、 $L_{a-g}$ 是地-气耦合辐

射、 $L_{0,h}$ 、 $L_{0,l}$  分别是黑白靶标的辐亮度。 $L_a$ 、 $L_{a-g}$  根据大气测量装置数据处理得到， $L_{0,h}$ 、 $L_{0,l}$  根据地物光谱测量装置数据处理得到。

[0049] 作为实施方法的另一种方式，物方调制度可以通过直接读取大面积靶标遥感图像数据来计算得到，满足以下关系：

$$[0050] \quad M_{\text{物}} = \frac{DN_{\text{bar},h} - DN_{\text{bar},l}}{DN_{\text{bar},h} + DN_{\text{bar},l}}$$

[0051] 其中， $DN_{\text{bar},h}$  与  $DN_{\text{bar},l}$  是大面积黑白靶标扣除暗电流后的高低响应值。

[0052] 像方调制度通过选择周期黑白靶标遥感影像中对比度最大的一组靶标后，对靶标中心的有效亮暗靶标响应值进行统计平均得到，满足以下关系：

$$[0053] \quad M_{\text{像}} = \frac{DN_{\text{I arg e},h} - DN_{\text{I arg e},l}}{DN_{\text{I arg e},h} + DN_{\text{I arg e},l}}$$

[0054] 其中， $DN_{\text{large},h}$  与  $DN_{\text{large},l}$  是周期黑白靶标扣除暗电流后的高低响应值。

[0055] 利用光学成像系统对其响应的像方调制度与物方调制度之比，并对零频率值进行归一化可得，可以得到系统对比度传递函数CTF

$$[0056] \quad CTF = M_{\text{物}} / M_{\text{像}}$$

[0057] 在获取物方及像方调制度后，根据CTF与MTF的关系可得光学卫星传感器在奈奎斯特频率处MTF值，进而利用参数化MTF模型可得到全频率的MTF曲线。

$$[0058] \quad MTF(0.5) \approx \frac{\pi}{4} CTF(0.5) = \frac{\pi}{4} M_{\text{物}} / M_{\text{像}}$$

[0059] 除调制度法外，本领域专业人员也可以通过其他等效方法进行计算。本发明的示例是想对数据处理子系统的计算过程进行明确，基于目前系统设计，本发明的这两种示例中的方法工程可实现性更高，且可与系统的硬件设计相匹配。

[0060] 通信子系统，本发明所涉及的通信子系统采用常规的无线网络通信系统实现，通过无线传输网络，实现各子系统之间的数据交互，包括数据采集装置和网络交换装置，其他各分系统数据通过数据采集装置进行采集后，通过网络交换装置进行交互。



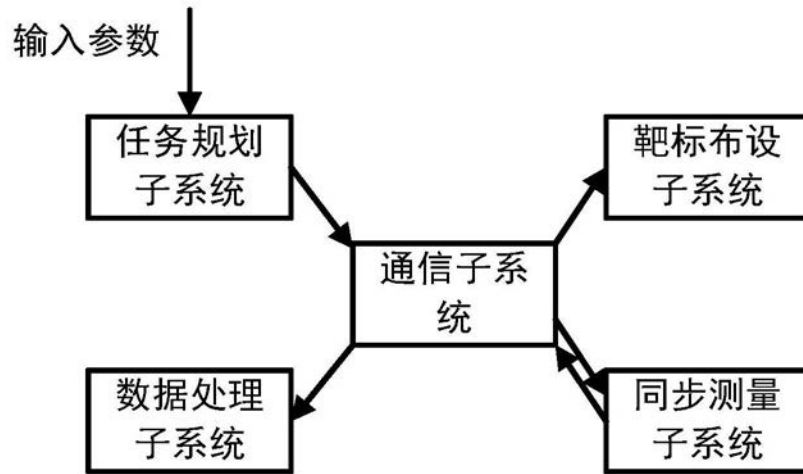


图1

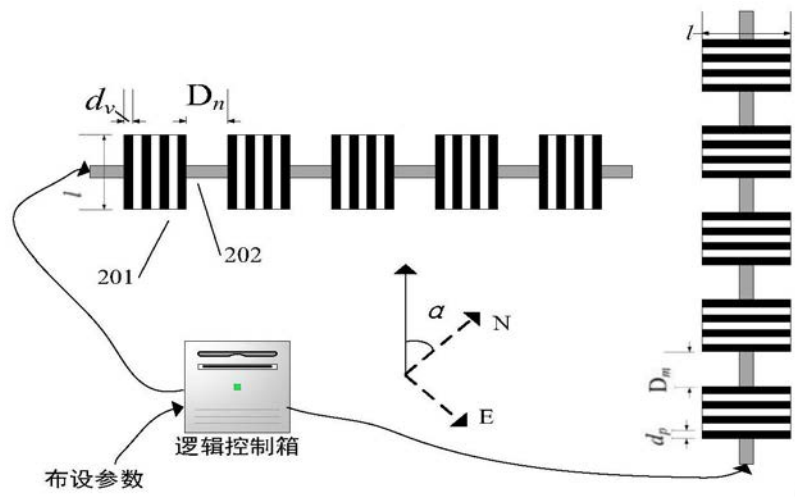


图2

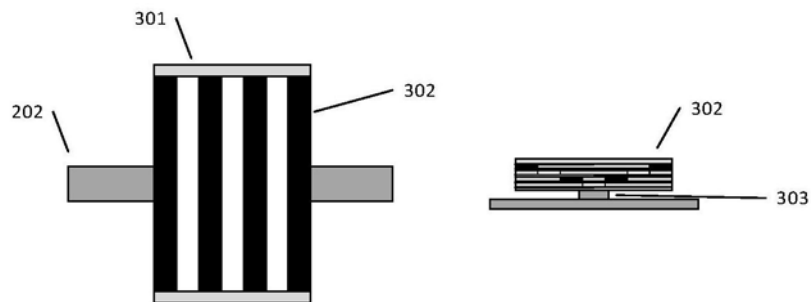


图3

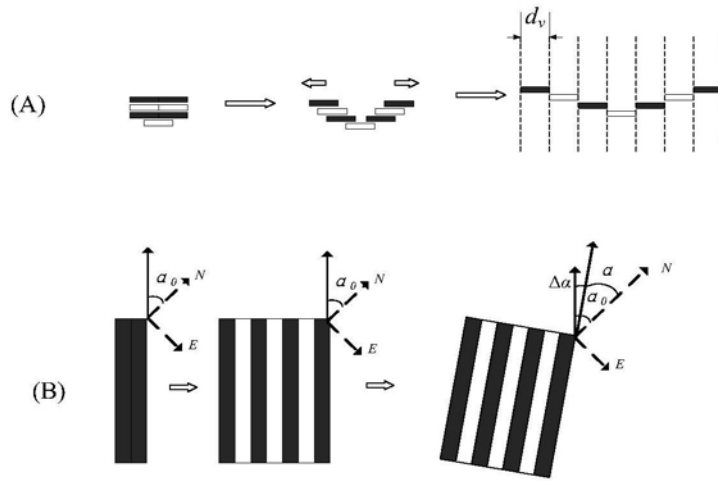


图4

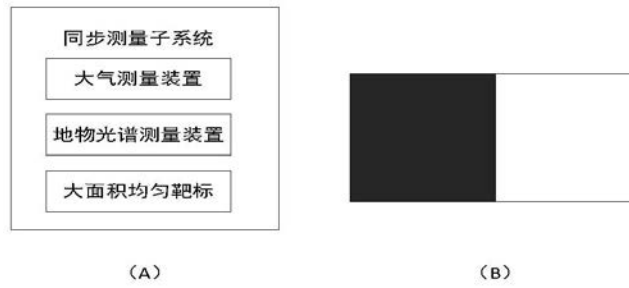


图5

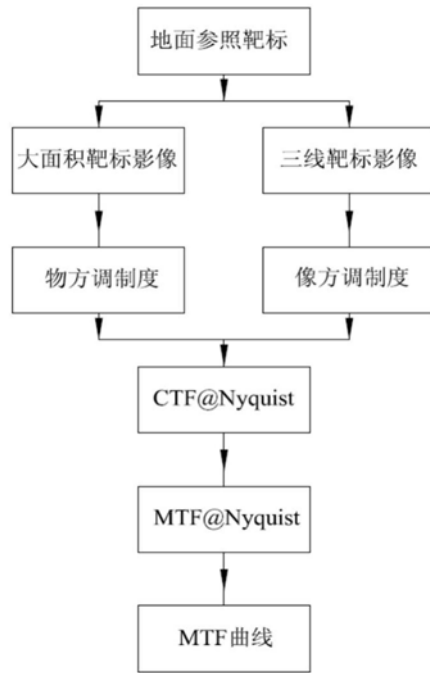


图6