

多视场空间相机成像轨迹计算与应用^{*}

武夷楠 吕增明

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 多视场空间相机包含多个独立的光学成像系统,为保证在轨连续成像时各视场成像条带满足重叠要求,需要精确的计算相机视场边缘对应的地面轨迹。首先根据空间相机为中心投影成像的特点,以坐标系变换结合共线方程推导像点与地面轨迹点的严格数学关系,接着以某单星双视场相机为例计算在不同纬度和姿态下的成像条带,以条带重叠作为约束,遍历计算安装方位角为 -0.28° 时,可以保证卫星 $\pm 40^\circ$ 侧摆范围内成像时,两个视场的条带图像满足重叠要求。该方法同样可应用于其他类型空间相机在任何姿态下的地面轨迹计算。

关键词: 多视场空间相机;地面轨迹;共线方程;成像条带

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

Calculation and application of imaging track for
multi-fields space camera

Wu Yinan Lv Zengming

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Multi-fields space camera contains multiple independent system of optical imaging. In order to ensure overlapping of each imaging bands while space camera imaging continuously on the orbit, the ground-track of field edge for camera need to be calculated accurately. Firstly, according to the characteristic that space camera imaging is perspective projection imaging, the strict mathematical relationship between image point and ground-track point was deduction by combining space coordinate transformation with collinearity equation of centre projection. Then, illustrating by the case of double fields camera, the imaging bands behind different latitudes and attitudes were calculated. Finally, the fixing azimuth angle was calculated by restriction of bands overlapping. The optimal value is -0.28° . These two imaging bands of fields satisfied the requirement of overlapping, while satellite scrolling imaging between $+40^\circ$ and -40° . The method can be applied to other space camera of different types, and the ground-track can be calculated at any attitudes.

Keywords: multi-fields space camera; ground-track; collinearity equation; imaging bands

1 引言

空间相机是航天器上应用最广泛和最重要的有效载荷之一,通过对地成像可以获取地球表面各类信息,广泛应用于国土资源勘测、军事侦查和灾害评估等领域^[1-2]。TDICCD空间相机通过推扫成像可以获取连续的成像条带,目前在轨应用最多。地面成像幅宽是TDICCD相机的重要技术指标,决定了相机的对地覆盖能力。目前成像条带幅宽大多是通过平面作图近似计算^[3-4],计算偏差较大,不能用于精确计算和定位。由于地球为椭球体,且空间相机需要完成各种姿态下的机动成像,所以成像条带会受上

述各种因素影响。

随着遥感成像不断发展,有时单星单台相机已经不能满足用户使用要求。例如:立体测绘卫星至少要搭载2~3台相机,通过协调安装可以满足对地立体成像要求^[5];有些多光谱或高光谱成像卫星也需要搭载不同谱段的相机。由于多台相机具有多个视场,需要保证各视场成像条带重叠以满足使用要求。本文以坐标系变换结合中心投影共线方程推导空间相机成像轨迹,耦合了相机、卫星、地球三者的各种静态条件和动态因素,可以准确直观的描述相机成像条带覆盖情况,以单星双视场相机为应用实例阐述成像条带分布情况,并以视场边缘轨迹作为约束条件求

收稿日期:2015-05

^{*} 基金项目:国家 863 计划(863-2-5-1-13B)资助项目

解2台相机之间最优的安装方位角。该方法同样可以应用到其他类型空间相机,具有良好的普适性。

2 基于共线方程的地面轨迹计算

通过追踪成像时段中相机视场两端像点所对应的地面轨迹点可以获得该时段的条带曲线。设定某一成像时刻,在地心惯性坐标系下, $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 为卫星摄像中心坐标位置, $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 为像面上选定的特征像点, $G(X_a, Y_a, Z_a)$ 为该特征点所对应的地面景物点。由于空间相机为中心投影成像,可以将地心惯性坐标系作为像空间辅助坐标系^[6],像点、卫星摄像中心点和地面景物点在该坐标系下共线,建立3个点之间的共线方程为:

$$\begin{bmatrix} X_p - X_s \\ Y_p - Y_s \\ Z_p - Z_s \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_a - X_s \\ Y_a - Y_s \\ Z_a - Z_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: λ 为比例因子。

为建立共线方程求解地面景物点坐标,首先计算空间相机摄像中心在惯性坐标系下的坐标 X_s, Y_s, Z_s ,需通过卫星本体坐标系→卫星轨道坐标系→地心惯性坐标系间的坐标变换完成,坐标系定义等文献^[7],推导表达式为:

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = Osat = (R_n \cdot R_{i0})^T \cdot [0 \ 0 \ Length]^T \quad (2)$$

$$A_t = \begin{bmatrix} \cos\varphi_t & \sin\varphi_t & 0 \\ -\sin\varphi_t & \cos\varphi_t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_t & 0 & -\sin\theta_t \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_t & 0 & \cos\theta_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中: $\varphi_t, \theta_t, \psi_t$ 分别为 t 时刻卫星横滚角、俯仰角、偏航角,均为已知量,横滚角、俯仰角根据卫星机动情况设定,偏航角为该时刻相机像移模型计算值^[8]。

x, y 为选定的特征像元像面坐标, f 为相机焦距。

在星下点纬度、姿态角和像面坐标给定的情况下,在惯性坐标系下的像点坐标经上述计算为确定值。

将共线方程组(1)消元转化得:

$$\begin{aligned} X_p - X_s &= \frac{(X_a - X_s)(Z_p - Z_s)}{Z_a - Z_s} \\ Y_p - Y_s &= \frac{(Y_a - Y_s)(Z_p - Z_s)}{Z_a - Z_s} \end{aligned} \quad (8)$$

地球旋转椭球面方程为式(9),其中 a_e, b_e 分别是地球的长短半轴:

$$\frac{X_a^2}{a_e^2} + \frac{Z_a^2}{a_e^2} + \frac{Y_a^2}{b_e^2} - 1 = 0 \quad (9)$$

上述3个方程式中只有 X_a, Y_a, Z_a 3个待求量,联立上述三元二次方程组可解。方程组有两组解,根据物理意义取 $|Y_a - Y_s|$ 绝对值小的一组作为有效解。将地面轨迹点转换为地球坐标系下的坐标 X_e, Y_e, Z_e ,即解得像面点所对应的地面点三维坐标,如式(10)。

式中:

$$R_{i0} = \begin{bmatrix} \cos(i0) & \sin(i0) & 0 \\ -\sin(i0) & \cos(i0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_{r0} = \begin{bmatrix} \cos(rout) & 0 & -\sin(rout) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(rout) & 0 & \cos(rout) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中相关卫星运行参数为:

$Length$ 为卫星轨道地心距, $i0$ 为卫星轨道倾角。

t 时刻卫星轨道幅角为:

$$rout = \pi - \arcsin(\sin(geolati)/\sin(i0)) + \Omega t \quad (5)$$

式中: Ω 为卫星轨道运动相对地心角速率, $geolati$ 为所定义0时刻卫星星下点纬度。在星下点纬度给定的情况下,摄像中心坐标经上述计算为确定值。

计算 t 时刻像点在惯性坐标系下的坐标 X_p, Y_p, Z_p 。

通过像面坐标系→相机坐标系→卫星本体坐标系→卫星轨道坐标系→地心惯性坐标系的坐标变换完成,文中相机坐标系和卫星本体坐标系重合。

像点在惯性坐标系下坐标经坐标变换为:

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = Opxl = (R_n \cdot R_{i0})^T \cdot A_t^T \cdot [x \ y \ f]^T + Osat \quad (6)$$

式中: t 时刻姿态旋转矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \cos\varphi_t & \sin\varphi_t \\ -\sin\varphi_t & \cos\varphi_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_t) & 0 & -\sin(\omega_t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\omega_t) & 0 & \cos(\omega_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 多视场相机地面覆盖范围推导

本文以双视场相机为例,包括全色成像与多光谱成像通道,在形式上相互独立,多光谱系统通过连接过度结构直接连接到全色系统上。全色系统与多光谱系统对同一地球景物点成像的时间与相机装调位置、卫星轨道、各系统光轴指向有关。卫星轨道一定时,多光谱相机地面成像覆盖范围能与全色相机重合,多光谱相机安装位置及光轴指向方向需要进行一系列计算以获得相机光轴方位角的设计参数。

如图1所示,全色相机与多光谱相机成像系统坐标系定义如下:全色系统相机坐标: $o_1x_1y_1z_1$,坐标系理论上与卫星本体坐标系重合, o_1z_1 轴过地球中心并指向天顶。全色系统像面系: $o'_1x'_1y'_1z'_1$;各坐标轴与相机坐标系对应平行,并沿 o_1z_1 轴向相距焦距 f_1 ;多光谱系统相机坐标系: $o_2x_2y_2z_2$,坐标中心点 o_2 在卫星本体坐标系中的安装位置坐标为 (X, Y, Z, α) , α 为相机光轴安装方位角,即坐标轴

$o_1 z_1$ 、 $o_2 z_2$ 的夹角; 全色系统像面系: $o'_2 x'_2 y'_2 z'_2$, 各坐标轴

与相机坐标系对应平行, 并沿 $o_2 z_2$ 轴向相距焦距 f_2 。

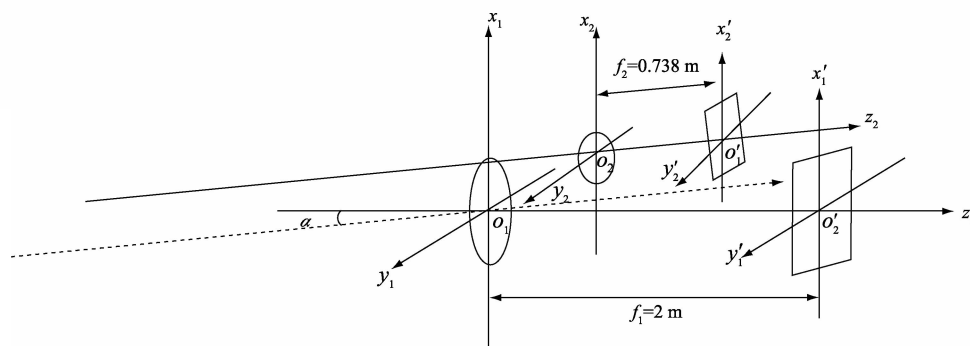


图1 成像系统坐标系分布

相关参数定义如下: X 、 Y 、 Z 为多光谱相机相对于全色相机的安装位置, 全色相机视场角 $fov1$, 多光谱相机视场角 $fov2$ 。离轴角均为 $angle$, 全色相机边缘 CCD 像元点在 $o'_1 x'_1 y'_1 z'_1$ 系中的坐标 $L(p_{1L}, p_{2L})$, $R(p_{1R}, p_{2R})$, $p_{1L} = p_{1R} = f_1 \cdot \tan(angle)$, $p_{2L} = f_1 \cdot \tan(fov1/2)$, $p_{2R} = f_1 \cdot \tan(-fov1/2)$ 。多光谱相机边缘 CCD 像元点在 $o'_2 x'_2 y'_2 z'_2$ 系中的坐标 $L(p'_{1L}, p'_{2L})$, $R(p'_{1R}, p'_{2R})$, $p'_{1L} = p'_{1R} = f_2 \cdot \tan(angle)$, $p'_{2L} = f_2 \cdot \tan(fov2/2)$, $p'_{2R} = f_2 \cdot \tan(-fov2/2)$ 。

全色相机 TDICCD 器件在推扫成像过程中需要进行偏流角匹配, 卫星偏航方向需要进行偏航机动, 使得全色相机及多光谱相机视场在成像过程中扫过的地球条带区域随时间变化^[9-10]。另一方面, 多光谱相机与全色相机对地球同一目标成像存在时间差, 因此多光谱相机光轴与全色相机光轴必定存在非零的方位安装角 α 。由于结构的影响, 卫星偏航机动并推扫成像的过程中, 多光谱相机的推扫区域理论必与全色相机地面推扫区域不能完全重合。最优的设计方案是使得多光谱相机的地面推扫区域在整个卫星成像过程中均匀包含全色相机地面推扫区域^[11]。

设 t 时刻卫星偏航角值为 $\psi(t)$, 俯仰角 $\theta(t)$, 横滚角 $\varphi(t)$, 卫星飞行成像, 全色相机某像元点所在视线在地球表面推扫的轨迹曲线记为 Γ_1 , 由泛函 $T_q: span(p_1, p_2, \psi, \theta, \varphi, t) \rightarrow \Gamma_1$ 确定。多光谱相机某像元点所在视线在地球表面推扫轨迹曲线记为 Γ_2 , 由泛函 $T_m: span(p'_1, p'_2, \psi, \theta, \varphi, t) \rightarrow \Gamma_2$ 确定。故令 $\Gamma_{1l}, \Gamma_{1r}, \Gamma_{2l}, \Gamma_{2r}$ 依次代表全色相机及多光谱相机左、右边缘视场在地球表面推扫的轨迹线。则:

$$\begin{aligned} T_q: span(p_{1L}, p_{2L}, \psi, \theta, \varphi, t) &\rightarrow \Gamma_{1l} \\ T_q: span(p_{1R}, p_{2R}, \psi, \theta, \varphi, t) &\rightarrow \Gamma_{1r} \\ T_m: span(p'_{1L}, p'_{2L}, \psi, \theta, \varphi, t) &\rightarrow \Gamma_{2l} \\ T_m: span(p'_{1R}, p'_{2R}, \psi, \theta, \varphi, t) &\rightarrow \Gamma_{2r} \end{aligned} \quad (11)$$

$$H_1 = \{\Gamma_1 | t \in [t_1, t_2], p_2 \in [p_{2L}, p_{2R}]\} \quad (12)$$

$$H_2 = \{\Gamma_2 | t \in [t_1, t_2], p'_2 \in [p'_{2L}, p'_{2R}]\} \quad (13)$$

多光谱相机视场在整个成像过程中能够无遗漏覆盖全色相机视场所摄取地球景物区的充要条件为: $H_1 \in H_2$, 所以需要遍历计算不同姿态角度和不同成像纬度区域条件下, 全色相机和多光谱相机的地面轨迹点集, 搜索计算最能满足上述要求的安装方位角 α 作为最终设计值。

相机实际成像轨迹为连续曲线, 而上述计算推导过程均是针对某一时刻的轨迹点, 所以需要设置采样时间间隔。根据实际工程情况, 采样间隔设置为 0.1 s 即可满足使用要求。

4 实例分析结果

举例说明: 参照第 2 节参数定义, 某遥感相机轨道高度为 1 200 km; 轨道倾角为 100° ; 相机焦距 $f_1 = 2$ m, $f_2 = 0.75$ m; 视场角 $fov1 = 17^\circ$, $fov2 = 18^\circ$; 离轴角 $angle = -5.6^\circ$; 多光谱相机安装位置 $X = 0.467$, $Y = 0.218$, $Z = 0$; 卫星下行, 姿态角调整范围为 $\pm 40^\circ$, 成像纬度范围为 $\pm 85^\circ$ 。

采用 MATLAB 实现上述模型, 迭代搜索计算, 当方位角 $\alpha = -0.28^\circ$ 时, 多光谱相机成像范围能够在对全色相机成像范围实现最均匀覆盖, 如图 2 所示, 图 2 为平飞状态下, 全色相机推扫条带与多光谱相机推扫条带的总体三维图, 全色相机和多光谱相机的左右视场边缘轨迹都会随着卫星的下行成像而变化, 由于高纬度地区地球半径更短, 相机视线更长, 视场宽度在高纬度地区相对更宽。两台相机的视场重叠度一直保持很均匀。相机在卫星最大左右侧摆 40° 成像时, 在北纬 85° 至南纬 85° 区间, 多光谱相机仍然能够实现对全色相机的景物覆盖, 只是覆盖的均匀性较平飞模式有所退化, 如图 3、图 4 所示, 图 3 为左侧摆 40° 时推扫条带平面图(经、纬度展开平面), 图 4 为右侧摆 40° 时推扫条带平面图。侧摆成像模式下, 在高纬度地区的重叠均匀性要比赤道地区降低, 但仍能保证不出现重叠视场盲区。图 5 为左侧摆 40° 成像推扫条带赤道附近放大曲线, 多光谱相机和全色相机左右视场轨迹之间还有较大的重叠余量。所以通过本文方法可以得到全纬度范围内的相机视场地面轨迹, 相比平面作图方法, 计算结果更为精确, 并可以应用到对相机内方位元素的约束计算。

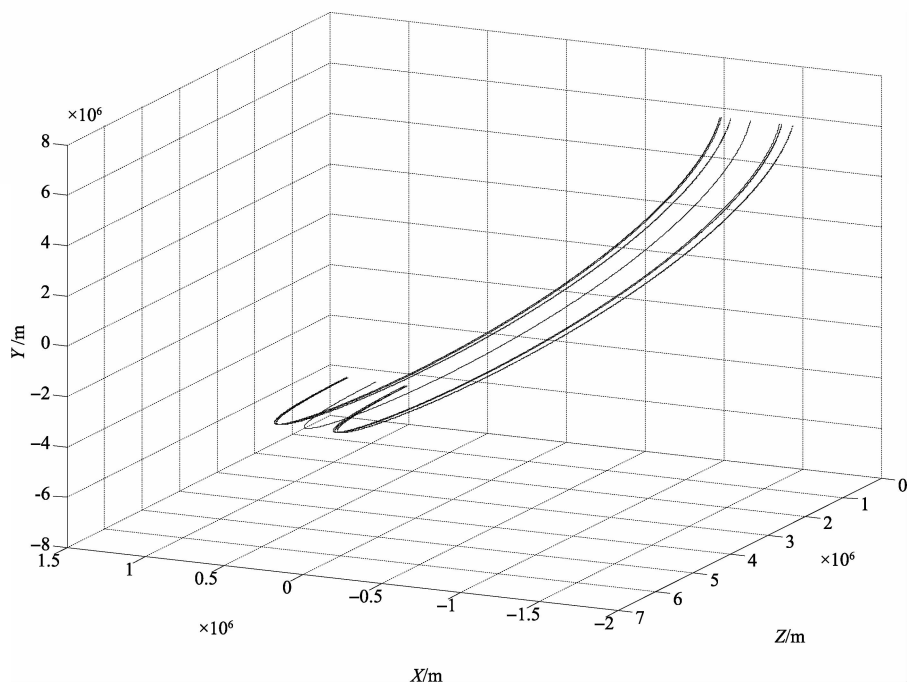


图2 平飞成像推扫条带三维图

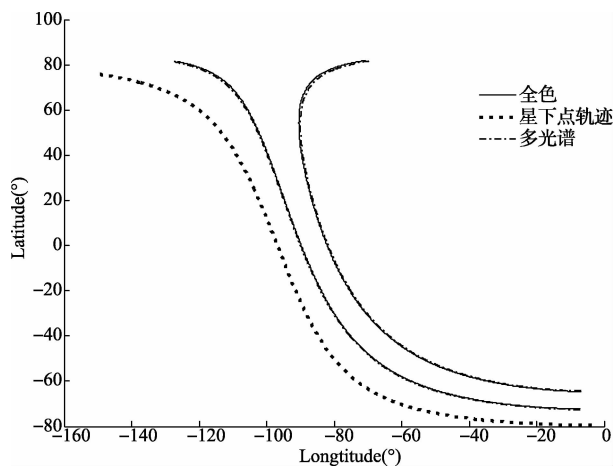


图3 左侧摆40°成像推扫条带平面图

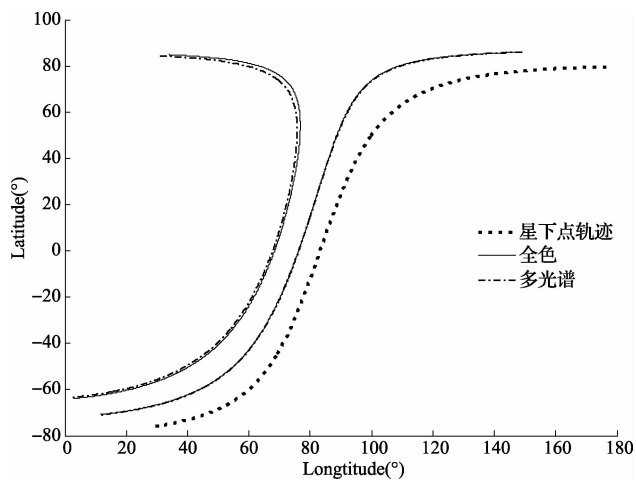


图4 右侧摆40°成像推扫条带平面图

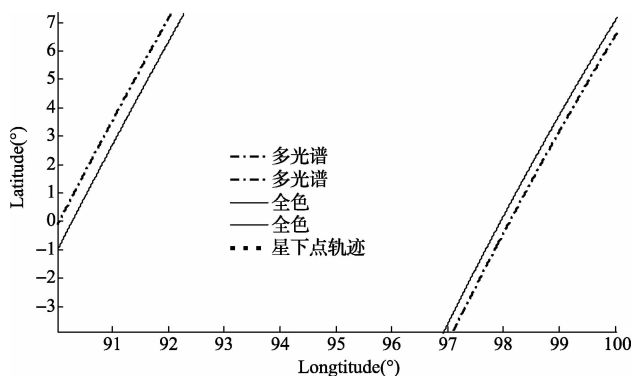


图5 左侧摆40°成像推扫条带赤道附近放大曲线

5 结论

多视场空间相机在轨成像时需要保证各视场成像条带重叠以满足使用要求,所以需要计算视场边缘地面成像轨迹。本文以坐标系变换结合中心投影共线方程推导空间相机成像轨迹,可以准确直观的描述相机成像条带覆盖情况,并以单星双视场相机为例计算成像条带在不同纬度和姿态下的分布情况,并以条带重叠作为约束条件求解两台相机之间最优的安装方位角,当方位角为 -0.28° 时,能保证卫星在 $\pm 40^\circ$ 侧摆范围内机动成像时两个视场的条带图像重叠。同样,该模型可以应用到其他类型空间相机对地成像轨迹计算。

参考文献

- [1] 李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,

- 28(5):469-477.
- [2] 施晓东,刘格. 一种光学遥感图像海陆分割方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(11):29-32.
- [3] 罗宇阳,谢亚男,戎鹏志,等. 倾角偏置太阳同步轨道的地面轨迹保持方法[J]. 上海航天,2007,24(2):11-15.
- [4] 张贵祥,金光,曲宏松. 星载光学传感器地面幅宽与轨道参数之间关系[J]. 光学精密工程. 2008. 16(8): 1522-1527.
- [5] 苗健宇,张立平,田铁印,等. 三线阵 CCD 立体测绘相机结构实现技术[J]. 仪器仪表学报,2011,32(10): 2183-2189.
- [6] 沙月进,程迪胜,张小琴. 基于核线约束的图像匹配中同名点局部区间确定方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013, 43(11):283-285.
- [7] 王家琪,于平,颜昌翔,等. 航天光学传感器像移速度矢计算数学模型[J]. 光学学报, 2004, 24(12): 1585-1589.
- [8] 武星星,刘金国. 基于地球椭球的空间相机侧摆摄影像移补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 351-359.
- [9] 王栋,闫得杰,吴伟平,等. 高分辨率空间相机实时偏流调整的误差分析及地面验证[J]. 仪器仪表学报, 2014,35(9):1955-1962.
- [10] 武奕楠,张宇,韩双丽,等. 长线阵 TDICCD 空间相机像移匹配及 MTF 分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 71-75.
- [11] 顾营迎,宁飞,董智萍,等. 空间相机成像配置参数自动测试[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(6):549-554.

作者简介

武奕楠,1984 年出生,硕士研究生。助理研究员。主要研究方向为光电成像。

E-mail:wyn_buaa@163.com

吕增明,1978 年出生,本科,助理研究员。主要研究方向为空间相机电源。

是德科技推出全新紧凑型台式电源,具备高精度和可靠性

紧凑的外形和现代 I/O 接口,帮助研发工程师快速、便利地完成产品设计和验证

是德科技(NYSE:KEYS)日前宣布推出一系列紧凑型直流电源,标配 LAN 和 USB 接口,为研发和测试工程师提供精确、可靠的测试和验证手段。E36100 系列电源共有 5 个型号,输出最高电压高达 100 V,而最大电流也达到 5A。这让 是德科技 极负盛誉的台式电源系列更加丰富。

无论在手动还是自动测试,工程师在产品设计和验证过程中,需要安全、便利、可靠地给被测件(DUT)供电。往往由于繁杂的测试任务,工作台上经常堆得满满当当。

E36100 系列的紧凑外形(2U 高、1/4 机架宽)能够为工程师节省工作台或机架的空间,并通过标配 LAN(LXI Core)和 USB 接口轻松连接计算机;直观的屏幕菜单系统,让工程师进行便捷设置;过压和过流保护使被测件万无一失。

是德科技电源与能源事业部总经理 Kari Fauber 表示:“我们的客户需要一台具备高品质的台式电源,提供现代 I/O 接口、紧凑的外观和出色的工作台适用性。我们提供 E36100 系列的目的,正是为了切合研发和设计验证工程师的实际需要,为被测器件提供可靠的供电,帮助工程师面对重重压力时也能更快地完成高质量的设计。”

E36100 系列电源的 5 个型号的标准配置:

1)精度高达 40 μ A 的电流测量能力。

2)高亮度 OLED 显示,从不同方向均可清晰地观察屏幕显示,不受视角影响。

3)支持 BenchVue 软件、IVI 驱动程序和 SCPI 命令。

4)3 年保修和是德科技全球联保支持。