

文章编号: 1672-8785(2013)09-0013-06

航空测绘相机几何标定方法

惠守文^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 测绘相机几何标定在航空测绘中具有重要作用。具有测绘功能的相机在使用前必须经过标定。分析了测绘相机几何标定的基本原理和方法, 然后对精密测角算法、改进精密测角算法、三维试验场标定法、张正友标定法、径向排列约束 (Radial Alignment Constraint, RAC) 标定法以及自标定方法进行了具体分析, 并给出了各种标定方法的精度对比及评价分析, 从而为处于不同环境条件下的航空测绘相机的几何标定提供参考。

关键词: 航空测绘相机; 内方位元素标定; 针孔模型; 外方位元素标定

中图分类号: TH761 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.09.003

Geometric Calibration of Airborne Mapping Camera

HUI Shou-wen^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The geometric calibration of a mapping camera is important in aerial mapping. A mapping camera should be calibrated before it is used. The fundamental principle and method of the geometric calibration of a mapping camera are analyzed. Then, several methods such as the exact angle measurement, PAMC, Tsai's two stage method, Zhang's method, RCA method and self-calibration method are analyzed in particular. Their accuracy and features are given. The result is helpful to the geometric calibration of airborne mapping cameras in different environment.

Key words: aerial mapping camera; intrinsic parameters calibration; pinhole model; extrinsic parameter calibration

0 引言

测绘相机几何标定的目的是给出将物方三维坐标转换为图像二维平面坐标时所需的元素参数, 在航空测绘中具有重要的作用。目前几种比较常用的几何标定方法均是这样实施的: 根据用测绘相机对经过精确测量的标定物拍摄的

一张或多张相片得到标定物及相片的相互位置关系, 然后根据一定的约束条件由物像位置关系得到一个超定、非线性方程矩阵, 最后通过设置合适的初值对该方程矩阵进行迭代优化求解, 计算出测绘相机的待标定元素参数^[1-4]。

对测绘相机的主点和主距等内方位元素进行精确标定, 从而将像点校正至正确的成像位

收稿日期: 2013-04-29

基金项目: 国家高分重大专项 (民用部分) 航空系统项目 (30-H32A01-9005-12/12)

作者简介: 惠守文 (1974-), 男, 吉林白城人, 研究员, 硕士, 主要从事航空遥感相机的设计研究。

E-mail: hsw_1@sohu.com

置,这是实现高精度测绘的一个必要条件。要提高航空测绘精度,就必须提高测绘相机的几何标定精度。虽然国内外已报道过对测绘相机进行几何标定的多种方法^[5-7],但这些方法在一定程度上反映出了测绘相机几何标定的不完善性,必须对其进行归纳和整理。

本文对近年来国内外比较成熟的 6 种标定方法的原理进行了简单论述,并给出了各种标定方法的优缺点、适用条件及其可达到的精度指标。

1 测绘相机几何标定的原理及方法

理想的光学成像模型(pin-hole)应遵循光线的直线传播原理。如图 1 所示,位于物方视场角 α_i 上的物点 P_i 应成像在像面的 P_{ii} 处,但是由于存在光学元件的制造误差、机械装调误差以及光学像差,会产生光学畸变,使物点 P_i 的像点实际成像在 P'_i 处。因此,需要对相机进行几何标定,以纠正像点的 2D 坐标,提高 3D 重建的精度。

下面简要介绍目前国内外航空测绘相机常用的几种几何标定方法。

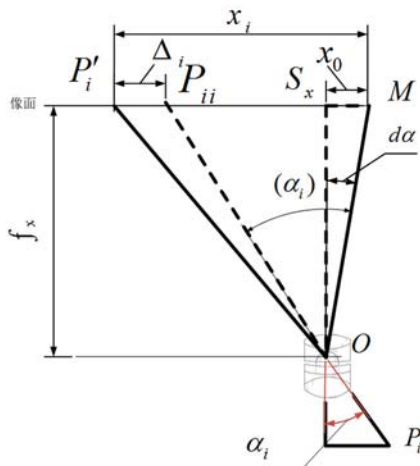


图 1 测绘相机的内方位元素标定原理

1.1 精密测角算法

精密测角算法是人们在实验室内对测绘相机的内方位元素进行几何标定时经常采用的一种方法。该算法直观简洁,精度较高,工作量大,有时需要拍摄数十张照片,数据量较大;同时对

实验环境要求苛刻,需要使用高精度精密转台。这种标定算法适用于对各种可见光、红外数字测绘相机的内方位元素进行几何标定。

精密测角算法的标定原理是,将相机置于精密转台上,然后对经过平行光管的星点进行成像。如图 1 所示,当光学系统具有畸变时, α_i 处的 P_i 光线的光学畸变 Δ_i 为

$$\Delta_i = x_i - x_0 - f_x \times \tan(\alpha_i - d\alpha) \quad (1)$$

用精密转台改变角度,获取多个角度时的星点及像点位置。通过记录成像时的转台角度及像点位置,并根据全视场畸变平方和最小原则,可得主点和主距的计算公式:

$$x_0 = (-\sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^2 \alpha_i + \sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i) / [\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2] \quad (2)$$

$$f_x = (\sum x_i \tan \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - \sum x_i \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^3 \alpha_i) / [\sum \tan^2 \alpha_i \times \sum \tan^4 \alpha_i - (\sum \tan^3 \alpha_i)^2] \quad (3)$$

在采用单轴转台时,可以采用相机翻转 90° 的方法获取正交方向上的主点 y_0 和主距 f_y ,并以根据 $f = (y_0 + f_y)/2$ 求得的 f 作为相机的主距。

精密测角算法的精度主要受转台精度和像坐标获取精度的影响,同时跟采样点的数量和分布情况也有关系。不同的实验环境条件可能会导致不同的标定精度。文献 [8] 对其精度进行了详细分析。文献 [9] 的结论表明,该方法在主点和主距的标定精度上分别可达到 $2.51 \mu\text{m}$ 和 $1.3 \mu\text{m}$ 。

1.2 精密测角改进算法

为了避免求解非线性方程,精密测角算法在计算中对式 (1) 进行了近似简化,于是便带来了理论误差;同时,其算法精度对采样点数量和分布状态比较敏感。针对上述两个问题,文献 [10] 提出了一种基于精密测角算法的分组渐进算法(即 PAGM 算法),它在不改变精密测角算法试验环境的条件下,采用分组渐进逼近和权值理论对精密测角算法进行了改进,避免了理论误差以及采样点对算法精度的影响,提高了标定精

度。该算法适用于对各种可见光、红外数字测绘相机的内方位元素进行几何标定。图 2 为 PAGM 算法的流程图。

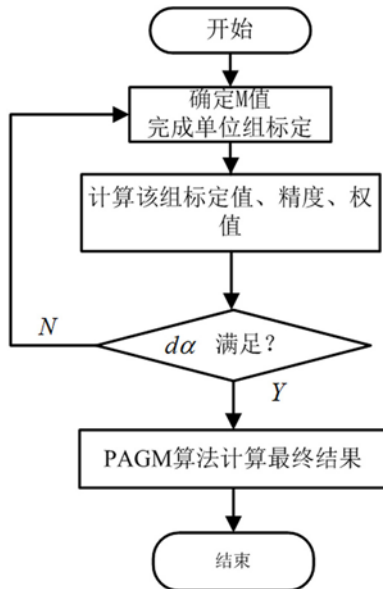


图 2 PAGM 算法的流程图

PAGM 算法首先根据误差传递理论分析了精密测角算法中影响标定精度的误差因素, 然后根据最大似然理论确定了各组观测数据的权值, 减小了算法的理论误差; 同时根据参数一致性约束, 消除了观测点状态对标定精度的影响。根据文献 [10] 可知, 与传统的精密测角算法相比, 该改进算法在主点和主距标定精度上分别提高了 2.43 倍和 2.00 倍。

1.3 外场控制点标定方法

在理想的成像条件下, 像点、投影中心以及相应地面点之间应该满足共线条件方程式, 因此可以通过空间后方交会对测绘相机进行几何标定。首先在实验室内或外场中布置经过精密测量的三维控制点, 然后用相机对控制场中经过精密测定的控制点进行成像。以物方控制点的坐标作为真值, 以像点坐标作为观测值, 根据中心投影的构像方程对待标定参数元素进行求解^[11]。在外业操作中, 通常采用空中三角测量方法对测绘相机的几何元素进行精密标定。相关数据表明, 通过配备高精度三维控制场, 该算法对方位元素的标定精度可以达到亚像素级。

这种标定算法在理论上可以适用于对任何类型的测绘相机进行几何标定。

1.4 张正友标定法

当标定物均位于同一平面上时, 该标定方法要求相机至少在两个不同的位置上 (不能是纯平移) 对同一个标定物进行成像。根据文献 [12] 的结论, 标定物可以通过激光打印机打印出来。

下面介绍张正友提出的标定原理算法。物点坐标点 P 及其投影像点 p 满足以下成像模型:

$$\lambda p = C[R \ t]P \quad (4)$$

式中, λ 为摄影比例系数常量; $[R \ t]$ 为外方位元素参数, 代表坐标系转换过程中的旋转及平移; C 为测绘相机的内方位元素矩阵。

$$C = \begin{bmatrix} 1/dx & \gamma & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, dx 和 dy 分别为 CCD 像元在 X 、 Y 方向上的尺寸; u_0 和 v_0 为主点坐标。通过适当地选取坐标系, 可以使标定物的 Z 向坐标变为零。根据式 (4), 便可得:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = C[R \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = C[r_1 \ r_2 \ t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, r_1 和 r_2 分别为旋转矩阵 R 的第 1 行和第 2 行。根据旋转矩阵的正交性, 可得:

$$\begin{cases} t_i^T \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot t_j = 0 \ (i \neq j) \\ t_i^T \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot t_i = t_j^T \cdot C^{-T} \cdot C^{-1} \cdot t_j \end{cases} \quad (7)$$

式中, C^{-T} 表示 $(C^{-1})^T$ 或者 $(C^T)^{-1}$ 。

令 $M = C^{-T} \cdot C^{-1}$ 且 $\gamma = 0$ 时, 可以得到:

$$M = \begin{bmatrix} 1/\alpha^2 & 0 & -u_0/\alpha^2 \\ 0 & 1/\beta^2 & -v_0/\beta^2 \\ -u_0/\alpha^2 & -v_0/\beta^2 & u_0/\alpha^2 + v_0/\beta^2 + 1 \end{bmatrix} = M^T \quad (8)$$

即 M 是一个对称矩阵。定义参数 m :

$$m = [M_{11} \ M_{12} \ M_{22} \ M_{13} \ M_{23} \ M_{33}]^T \quad (9)$$

则式 (7) 可以用参数 m 来表示:

$$t_i^T \cdot M \cdot t_j = [t_{i1}t_{j1} \quad t_{i1}t_{j2} + t_{i2}t_{j1} \quad t_{i2}t_{j2} \\ t_{i3}t_{j1} + t_{i1}t_{j3} \quad t_{i3}t_{j2} + t_{i2}t_{j3} \quad t_{i3}t_{j3}]m^T = 0 \quad (10)$$

记

$$V_{ij} = [t_{i1}t_{j1} \quad t_{i1}t_{j2} + t_{i2}t_{j1} \quad t_{i2}t_{j2} \\ t_{i3}t_{j1} + t_{i1}t_{j3} \quad t_{i3}t_{j2} + t_{i2}t_{j3} \quad t_{i3}t_{j3}]^T \quad (11)$$

此时式 (7) 可以变换为

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ (V_{11} - V_{22})^T \end{bmatrix} \cdot m = 0 \quad (12)$$

简写为 $Vm = 0$ 。

从 n 个不同角度拍摄同一幅标定物图像, 可以得到 $2n \times 6$ 大小的矩阵 V 。当 $n \geq 3$ 时, 可以得到超定方程组的最优解 m , 进而求得主点和主距:

$$u_0 = -M_{13}/M_{11} \quad (13)$$

$$v_0 = -M_{23}/M_{22} \quad (14)$$

$$f = \sqrt{\frac{M_{33} + M_{13} + M_{23}}{M_{11}}} \cdot dx \quad (15)$$

张正友同时给出了畸变系数的迭代求解方法。由于具有良好的鲁棒性以及不需要精确的标定块, 张正友提出的标定方法具有较强的实用性。

当标定物位于不同的平面上时, 式 (12) 可以表达为

$$\begin{bmatrix} V_{12} \\ V_{13} \\ V_{23} \\ V_{11} - V_{22} \\ V_{11} - V_{33} \\ V_{33} - V_{22} \end{bmatrix} \cdot m = 0 \quad (16)$$

此时 V 为 $6n \times 6$ 矩阵, 在理论上用一张图片即可求解出所有的内方位元素。文献 [13] 根据式 (16) 对测绘相机的内方位元素进行了求解, 其主点和主距的标定精度可以达到 $3 \mu\text{m}$ 和 $7.5 \mu\text{m}$ 。由于仅涉及到物像共轭关系中的旋转矩阵, 该

标定算法适用于任何成像关系满足式 (4) 的可见光、红外、胶片或光电测绘相机。

1.5 基于 RAC 的标定方法

图 3 为 RAC 的示意图。其中, 地物点 P 的理论成像点为 P_u , 但由于受畸变的影响, 其实际成像点为 P_d 。如果在成像过程中可以忽略其他畸变向量而只考虑径向畸变, 那么此时向量 $\overrightarrow{O_1P_d}$ 总平行于光轴上与物点 P 的 Z 向坐标相同的点 P_{oz} 指向物点 $P(x_w, y_w, z_w)$ 的向量, 这就是径向约束。

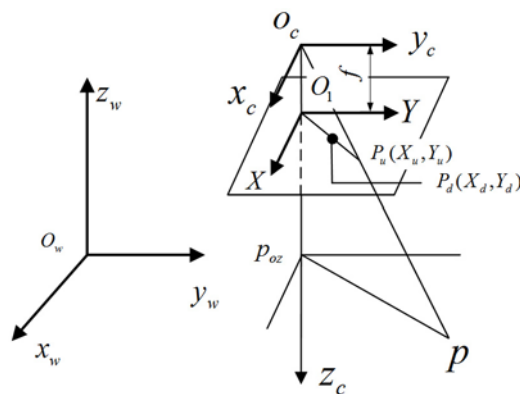


图 3 RAC 的示意图

具体的求解过程如下: 通过刚体平移向量 T 和旋转变换矩阵 R , 求解出地面摄影测量坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 中点 P 在相机坐标系 $S-XYZ$ 中的坐标 (x_c, y_c, z_c) , 即

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

$P_u(X_u, Y_u)$ 为物点 P 的理想成像, 即无畸变时:

$$X_u = f \frac{x_c}{z_c}, \quad Y_u = f \frac{y_c}{z_c} \quad (18)$$

当成像系统具有径向畸变时, 仅取畸变首项:

$$X_d = \frac{X_u}{1 + k_1(X_u^2 + Y_u^2)}, \quad Y_d = \frac{Y_u}{1 + k_1(X_u^2 + Y_u^2)} \quad (19)$$

式中, k_1 为畸变系数。由于 $\overrightarrow{O_1P_d} // \overrightarrow{P_{oz}P}$, 可得:

$$\overrightarrow{O_1P_d} \times \overrightarrow{P_{oz}P} = 0 \quad (20)$$

通过设置合适的地面摄影测量坐标系使 P 点的 Z 向坐标为零, 可以得到:

$$\begin{aligned} & x_d(r_4x_w + r_5y_w + r_6z_w + T_y) - y_d \\ & \times(r_1x_w + r_2y_w + r_3z_w + T_x) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

式中, r_1 、 r_2 、 r_3 分别为旋转矩阵 R 的第 1 行、第 2 行和第 3 行。当平面中具有 i 个控制点且 i 大于待求未知数时, 根据式 (21) 可以得到以下超定方程组:

$$\begin{bmatrix} y_{di}x_{wi} & y_{di}y_{wi} & y_{di} & -x_{di}x_{wi} & -x_{di}y_{wi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_y^{-1}r_1 \\ T_y^{-1}r_2 \\ T_y^{-1}T_x \\ T_y^{-1}r_4 \\ T_y^{-1}r_5 \end{bmatrix} = x_{di} \quad (22)$$

根据最小二乘法求解得出:

$$[T_y^{-1}r_1 \quad T_y^{-1}r_2 \quad T_y^{-1}T_x \quad T_y^{-1}r_4 \quad T_y^{-1}r_5]^T$$

根据旋转矩阵的单位正交性, 求得旋转矩阵 R 和刚体平移矩阵 T 中的 x 、 y 元素。然后再用优化算法求解主距 f 、平移向量 T 的 z 元素以及径向畸变系数 k_1 的最优值。在一般情况下, 通过很少次 (3 至 5 次) 迭代即可完成求解。

基于 RAC 的标定算法是通过将相机的内、外方位元素分离开来求解的, 因此只需一幅照片就可快速、准确地对相机的内方位 (只考虑径向畸变, 这对大部分测绘相机来说是允许的) 和外方位元素进行标定^[14]。但该算法中并未包含主点的求解过程, 只能通过其他方法预先给出主点位置。而文献 [15] 则解决了这个问题, 并给出了 3 种用于确定相机主点位置的方法。

文献 [16] 给出了一种利用激光发生器和衍射光学元件的标定方法。他们用衍射光学元件将波长为 λ 的激光束分离成一系列已知方向的平行激光束, 然后利用 RAC 模型进行求解。根据该文献, 内方位元素标定的均方根误差不大于 $2 \mu\text{m}$ 。

基于 RAC 的标定方法只有在仅考虑径向畸变时才成立, 因此该标定算法只适用于精密装调的测绘相机 (此时其他畸变数值较小) 或者对精度要求不高的测绘相机。

1.6 自标定方法

上述几种标定方法均需在待标定相机前放置一个已知标定参照物, 其定标过程就是依据物体上的一些已知点的三维坐标及其图像点坐标, 计算待标定相机的内外参数。但是在某些场合中, 由于相机的某些参数 (例如焦距等) 需要经常调节, 在每次调节后均需对相机进行标定。然而, 在很多场合下人们不可能在相机前放置标定参照物。近年来, 有一种无需定标参照物的自标定技术受到了人们很大的重视, 并取得了巨大的发展。当前具有代表性的自标定算法主要包括: (1) 根据本质矩阵和基本矩阵进行自标定的方法^[17]; (2) 根据绝对二次曲线和二次曲面进行自标定的方法; (3) 利用主动视觉的自标定方法^[18]; (4) 根据消隐点或消隐线进行自标定的方法^[19]。这些自标定方法的算法复杂, 运算量较大, 方程解不稳定, 因此在高精度测绘相机中不太常用。

2 结束语

本文简要介绍了 6 种测绘相机内方位元素标定方法。应当指出的是, 按照不同的分类方法, 内方位元素标定方法具有不同的种类。

随着测绘技术的不断发展, 未来必将会有更简洁、更方便、精度更高的标定算法出现。测绘相机几何元素标定技术也将会取得进一步的发展: 首先, 对标准标定物的精度要求将会越来越低, 甚至无需使用标准标定物; 其次, 物理模型会变得更加合理, 算法也更趋于简洁, 易于实现; 最后, 由于测绘相机在工程应用中需要有调焦、像移补偿等动态过程, 内方位元素标定必将向实时、在线的标定方式发展。

随着航空测绘与计算机视觉技术的快速发展, 研究高精度、快速、便捷的内方位元素标定技术势在必行, 内方位元素标定装置也处于逐

步成熟和迅速发展当中。本文总结了航空测绘相机的多种几何标定方法,并给出了各种标定技术所能达到的精度及标定流程。在实际应用中,可根据所需的精度及环境条件,采用或设计不同类型、不同用途的测绘相机标定装置,以确保所需的测绘精度。

参考文献

- [1] 李德仁,王树根,周月琴. 摄影测量与遥感概论 [M]. 北京:测绘出版社, 2008.
- [2] 张涛,黄健. 多光谱相机的几何标定方法 [J]. 宇航计测技术, 2008, 28(4): 4-8.
- [3] 刘金国. 大视场光电测量系统的精密几何标定和畸变校正的研究 [J]. 光学精密工程, 1994, 2(4): 109-120.
- [4] 黄静,高晓东,马文礼,等. 大面阵数字航测相机的精密几何标定 [J]. 光电工程, 2006, 33(2): 138-142.
- [5] 李德仁,王新华. CCD 阵列相机的几何标定 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 1997, 22(4): 309-313.
- [6] Weng J Y. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation [J]. IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [7] Penna M A. Camera Calibration: a Quick and Easy Way to Determine the Scale Factor [J]. IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 13(12): 1240-1245.
- [8] 刘伟毅,贾继强,丁亚林,等. 精密测角法中测量误差对内方位元素标定的影响 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 705-709.
- [9] 刘波,贾继强,丁亚林. 基于测角法的 CCD 航测相机实验室几何标定 [J]. 激光与红外, 2010, 40(3): 298-301.
- [10] 远国勤,丁亚林,惠守文,等. 基于精密测角法的测绘相机分组渐进标定算法 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112005.
- [11] 黄桂平,李小勇,钦桂勤. 数码相机内参数的实验场法标定 [J]. 测绘学院学报, 2005, 22(3): 460-461.
- [12] Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration [J]. IEEE Transaction On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(1): 1330-1334.
- [13] 刘伟毅,丁亚林,贾继强,等. 借助于星点标定相机内方位元素 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2086-2089.
- [14] Tsai R Y. A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Camera and Lenses [J]. IEEE RA, 1987, 3(4): 323-344.
- [15] Lenz R K, Tsai R Y. Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology [J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 1988, 10(1): 713-720.
- [16] Bauer M, Griebach D, Hermerschmidt B, et al. Geometrical Camera Calibration with Diffractive Optical Elements [J]. J Opy Soc, 2008, 16(25): 20243-20248.
- [17] Longuet-Higgins H C. A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections [J]. Nature, 1981, 293(10): 133-135.
- [18] Caprile B, Torre V. Using Vanishing Points for Camera Calibration [J]. Int J Computer Vision, 1990, 4(2): 127-140.
- [19] Ma S D. A Self-calibration Technique for Active Vision System [J]. IEEE Trans On Robotics and Automation, 1996, 12(1): 114-120.

新闻动态 News

美国国防气象卫星运抵范登堡空军基地

据 www.spacenews.com 网站报道,美国洛克希德·马丁公司为美国空军翻新制造的两颗气象卫星中的首颗卫星已经运抵位于加利福尼亚州的范登堡空军基地,准备于 2014 年 3 月发射升空。

这颗卫星是美国空军的国防气象卫星计划 (DMSP) 的组成部分,负责提供全球的大气、海

洋、陆地以及空间环境信息。军事用户通常依靠卫星来为部队提供偏远地区和敌对地区的天气预报信息。

相关人员表示,这是他们拥有的第四颗 Block 5D-3 系列卫星。五十年来,他们已经制造了近 50 颗国防气象卫星,而且 Block 5D-3 系列卫星的性能也在不断提高。

此外,另一颗 DMSP 卫星计划于 2015 年发射升空。这两颗卫星也将是 DMSP 计划的收官之作。

□ 岳桢千