航天器交会计算机视觉系统测距求解新算法

朱仁璋 林 彦 张 磊

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

摘 要: 对航天器交会对接最终逼近段应用的计算机视觉系统,提出目标航天器标志点测距求解新算法. 该方法根据标志点构型几何特征,建立非线性测距方程组并构造加权目标函数,按最小二乘问题,采用 Gauss-Newton 数值迭代法求解测距最佳值. 获得测距后,即可应用四元数估算法(QUEST)确定相对姿态与相对位置. 对非共面标志点构型(如3点T型与5点锥型)和共面标志点构型(如正方形、矩形、菱形),目标函数均含标志点间距比率关系项;对共面构型,目标函数还包含共面条件项. 对共面标志点四边形构型,利用对角线交点的虚影像坐标确定测距求解迭代初值. 大量模拟计算结果表明,提出的测距求解算法对共面与非共面各种标志点构型普遍适用,满足最终逼近段相对状态确定要求.

关 键 词: 航天器交会; 航天器导航辅助; 计算机视觉

中图分类号: V 448

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0764-05

New algorithm of solving for ranges during final approach of spacecraft rendezvous

Zhu Renzhang Lin Yan Zhang Lei

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new algorithm of solving for ranges during the final translation phase of spacecraft rendezvous and docking using computer vision system was presented to determine relative attitude and position between target and chase spacecraft by Quaternion Estimation. In this algorithm for ranges, a weighted objective function was constructed according to target pattern and geometry feature and used for solving for ranges. For both non-planar (such as three-point T-type and five-point pyramid type) and co-planar patterns (such as square, rectangle and rhombus), the objective function contained terms concerning ratios of distances between the target spots; but for co-planar targets, the objective function had another terms which describe co-planar feature. Gauss-Newton method was applied to solve for the optimum range solutions of the least squares problem. For quadrilateral patterns, the initial values for iterations were given by coordinates of virtual image of the intersection point of two diagonal lines. Extensive simulations, conducted for various target patterns with image coordinates errors, show that the range algorithm presented is quite effective for the relative state determination.

Key words: spacecraft rendezvous; spacecraft navigation aids; computer vision

航天器交会对接最终逼近段的轨迹一般为准直线型,因此,最终逼近段也常称为最终平移段. 在这一阶段,需对目标航天器和追踪航天器的相对位移与相对姿态进行控制,以满足准直线运动轨迹、逼近速度、安全性及对接状态等项技术要求[1-3]. 计算机视觉系统是获得交会航天器相对状态信息的一种有效手段[4-7]. 文献[4-5]提出的相对状态求解方法,均是针对有一标志点在基准面外的构型. 其中,文献[4]对3点T型构型提出相对姿态参数近似解与修正解. 文献[5]对3点T型与5点锥型,应用 Newton-Raphson 迭代法求解测距非线性方程组,进而以三元组法(TRIAD)与

收稿日期: 2005-08-09

作者简介: 朱仁璋(1941-),男,江苏扬州人,教授, rz_zhu@tom.com.

四元数估算法(QUEST)确定相对姿态. 这里“测距”一词表示标志点与相机坐标系原点(相机透镜中心)之间的距离. 文献[6-7]讨论了所有 4 个标志点在基准面内的情况. 其中,文献[6]根据标志点正方形构型的特点,引入正方形中心(虚标志点)在相机成像面的坐标,推导出测距参数表示式. 文献[7]对菱形构型,利用 5 个角度量与 3 个线度量,建立描述相对位置和相对姿态关系的 8 个测量方程及 2 个约束方程,以最小平方和方法求解相对状态参数.

本文提出构造目标函数求解测距的方法,这种方法根据标志点构型几何特征建立测距方程组,并以此构造目标函数,按最小二乘问题,采用 Gauss-Newton 迭代法求解测距. 获得测距后,即可应用 QUEST 求解相对姿态[5,8],进而通过坐标变换与矢量代数运算求得相对位置[5]. 与其它方法相比,本文提出的测距求解算法有下列特点:①对各种共面或非共面标志点构型普遍适用;②在不计影像点坐标偏差的情况下,相对状态的逆算法解与相对状态设定值完全吻合;③在计及影像点坐标偏差情况下,算法收敛性好,测距与相对状态求解精度较高;④运算稳定,且比较简捷,不仅可用于标志点构型设计,而且适用于地面模拟与在轨运作.

1　计算机视觉系统

计算机视觉系统的标志点设置在目标航天器上,测量与图像处理设备装配在追踪航天器上. 标志点通常以对接面作为基准面,可以都在基准面内,也可以突出在基准面外. 根据标志点与影像点的坐标测定交会航天器相对状态的方法称为“逆算法”.

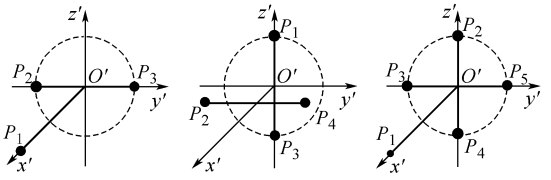
1.1　坐标系统

1) 标志点坐标系 $O'x'y'z'$. 该坐标系与目标航天器固连,原点位于标志点基准面(通常取为目标航天器对接面)几何中心;x'轴垂直于基准面,指向追踪航天器;y'轴与 z'轴位于基准面内,与 x'轴构成右旋系.

2) 相机坐标系 $Oxyz$ 与图像坐标系 $O_{\mathrm{p}}y_{\mathrm{p}}z_{\mathrm{p}}$. 这两个坐标系与追踪航天器固连. 相机系原点位于相机透镜中心;x 轴沿光轴方向,垂直于相机基准面(与追踪航天器对接面相合或平行),背向目标航天器;y 轴与 z 轴位于相机基准面内,与 x 轴构成右旋系. 图像系原点为相机光轴与成像平面的交点;y_{p} 轴与 z_{p} 轴位于成像平面内,分别与相机系 y 轴与 z 轴平行且指向一致.

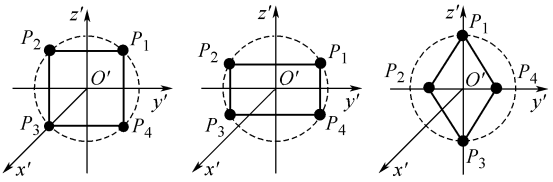
1.2　标志点构型

图 1 与图 2 为几种典型标志点构型. 其中,图 1 表示非共面构型,有 1 或 2 个标志点在基准面外;图 2 表示共面构型,标志点均在基准面内. 图中,P_i($i=1\sim5$)表示标志点.



a　3 点 T 型　　b　4 点分离十字型　　c　5 点锥型

图 1　非共面标志点构型



a　正方形　　b　矩形　　c　菱形

图 2　共面标志点构型

1.3　透视投影几何

设标志点个数为 n,标志点 P_i 在 $O'x'y'z'$ 系中的位置矢量 $\boldsymbol{R}'_i=[x'_i \quad y'_i \quad z'_i]^{\mathrm{T}}$,在 $Oxyz$ 系中的位置矢量 $\boldsymbol{R}_i=[x_i \quad y_i \quad z_i]^{\mathrm{T}}$,$P_i$ 的影像点 p_i 在图像坐标系中的坐标为 $y_{\mathrm{p}i}$ 与 $z_{\mathrm{p}i}$,则点 p_i 在 $Oxyz$ 系中的位置矢量 $\boldsymbol{r}_i=[f \quad y_{\mathrm{p}i} \quad z_{\mathrm{p}i}]^{\mathrm{T}}$,$i=1,2,\cdots,n$. 这里 f 为相机焦距. 有下列关系式(参见图 3):$x_i<0$, $y_{\mathrm{p}i}x_i=fy_i$, $z_{\mathrm{p}i}x_i=fz_i$.

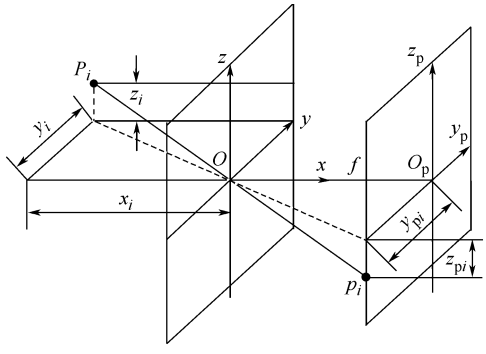


图 3　坐标系与空间透视投影几何

2　测距求解算法

2.1　测距方程与目标函数

为求解测距,依据标志点构型的几何特点,建立影像点坐标无偏差的测距方程组,并构造目标函数. 本文提出,对任一标志点构型,测距方程组均包含标志点间距比率关系式;此外,对共面构型,还应增加共面条件方程. 设标志点个数为 n

(其中任意3个标志点不共线),令

$$l_{ij}=(x_j-x_i)/D_{ij}$$
$$m_{ij}=(y_j-y_i)/D_{ij}$$
$$n_{ij}=(z_j-z_i)/D_{ij}$$

式中

$$D_{ij}=\sqrt{(x'_j-x'_i)^2+(y'_j-y'_i)^2+(z'_j-z'_i)^2}$$
$$x_j-x_i=a_iR_i-a_jR_j$$
$$y_j-y_i=b_iR_i-b_jR_j$$
$$z_j-z_i=c_iR_i-c_jR_j$$
$$a_i=f/r_i$$
$$b_i=y_{pi}/r_i$$
$$c_i=z_{pi}/r_i$$
$$r_i=\sqrt{f^2+y_{pi}^2+z_{pi}^2}$$

$i=1,2,\cdots,n-1$, $j=i+1,\cdots,n$. 标志点间距比率关系方程可以下列形式表示:

$$f_k=1-(l_{ij}^2+m_{ij}^2+n_{ij}^2)=0 \tag{1}$$

其中,3点T型,$k=1,2,3$;共面四边形,$k=1,2,\cdots,6$;5点锥型,$k=1,2,\cdots,10$. 共面条件方程有多种形式,如有量纲的4阶行列式方程,或无量纲归一化形式. 对共面四边形,可应用下列对角线交点测距方程:

$$f_{co}=1-R_{13}/R_{24}=0 \tag{2}$$

式中,R_{13}与R_{24}分别为两条对角线中点的测距. 若为平行四边形,则

$$R_{13}=\sqrt{R_1^2+R_3^2+2R_1R_3\cos\alpha_{13}}\Big/2$$
$$R_{24}=\sqrt{R_2^2+R_4^2+2R_2R_4\cos\alpha_{24}}\Big/2$$

式中 $\cos\alpha_{13}=(f^2+y_{p1}y_{p3}+z_{p1}z_{p3})\Big/(r_1r_3)$

$$\cos\alpha_{24}=(f^2+y_{p2}y_{p4}+z_{p2}z_{p4})\Big/(r_2r_4)$$

在影像点坐标包含测量噪声的情况下,通常不存在满足测距方程组的解,因此,基于测距方程组,建立下列关于残差平方和的目标函数G:

$$G(R_1,R_2,\cdots,R_n)=\sum_{i=1}^{m}\varepsilon_i f_i^2 \tag{3}$$

式中,ε_i为权系数,$0\leqslant\varepsilon_i\leqslant1$, $\sum_{i=1}^{m}\varepsilon_i=1$;$m$表示测距方程个数. 这样,测距求解问题就转为求解测距最佳解$R_1^*,R_2^*,\cdots,R_n^*$:

$$G(R_1^*,R_2^*,\cdots,R_n^*)=\min G(R_1,R_2,\cdots,R_n) \tag{4}$$

求得测距后,应用QUEST求解相对姿态[5,8]. 相对位置$\boldsymbol{T}=[T_x\quad T_y\quad T_z]^{\mathrm{T}}$可按下式求解[5]:$\boldsymbol{T}=\frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{T}_i\right]$, 这里$\boldsymbol{T}_i=\boldsymbol{R}_i-\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{R}'_i$.

2.2 数值求解方法

1) Gauss-Newton法. 迭代的一般形式如下:

$$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{x}_k-\left[\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{W}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}_k)\right]^{-1}\cdot\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_k)\boldsymbol{W}\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{x}_k=[R_{1k}\quad R_{2k}\quad\cdots\quad R_{nk}]^{\mathrm{T}}$,这里$R_{ik}$为$R_i$第$k$次迭代值;$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k)=[f_{1k}\quad f_{2k}\quad\cdots\quad f_{mk}]^{\mathrm{T}}$,这里$f_1,f_2,\cdots,f_m$见目标函数表达式,即式(3);$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{x}_k)$是$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k)$的$m\times n$维雅可比矩阵;$\boldsymbol{W}$是由权系数$\varepsilon_i$构成的对角矩阵. 权系数选取可根据目标函数具体表达式用参数法研究.

2) 迭代初值设置. 对非共面构型,面外标志点一般向前突出,测距小于面内标志点测距,初值的设置符合这个长短关系即可. 对共面构型,迭代对初值很敏感,要求初值更接近真实值. 对四边形标志点测距迭代初值的确定,本文利用对角线交点P_c的虚影像点p_c的坐标y_{pc}与z_{pc},如式(6).

$$\left.\begin{aligned}(z_{pc}-z_{p1})(y_{p3}-y_{p1})-\\(y_{pc}-y_{p1})(z_{p3}-z_{p1})=0\\(z_{pc}-z_{p2})(y_{p4}-y_{p2})-\\(y_{pc}-y_{p2})(z_{p4}-z_{p2})=0\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

在相对姿态偏差较小的情况下,标志点基准面和相机成像平面近似平行,故可用R_{i0}作为迭代初值.

$$R_{i0}=R_{ci}r_i/r_{ci} \tag{7}$$

式中,$R_{ci}=\sqrt{(y_i'-y_c')^2+(z_i'-z_c')^2}$,$y_c'$与$z_c'$为交点$P_c$在标志点坐标系的坐标;$r_{ci}=\sqrt{(y_{pc}-y_{pi})^2+(z_{pc}-z_{pi})^2}$;$r_i=\sqrt{f^2+y_{pi}^2+z_{pi}^2}$.

3 模拟计算

模拟算例给出测距及相对姿态与相对位置测定结果. 表中姿态角按3-2-1转序定义;下标m与s分别表示偏差绝对值的平均值与标准差.

3.1 参数与算例设置

对相对位置,在150~20 m范围内,采用焦距为30 mm的远场相机;在20~1.5 m范围内,换用焦距为23 mm的近场相机. 相对状态模拟算例的设置见表1.

表1 相对状态模拟算例设置

序号	1	2	3	4	5	6
ψ/(°)	5	0	-2	1	4	1
θ/(°)	1	-4	-2	2	-4	-2
φ/(°)	1	4	1	4	4	0
T_x/m	-100	-100	-100	-100	-100	-100
T_y/m	5	0	-1	5	5	1
T_z/m	1	5	1	-3	5	5

为检验本算法在影像点坐标偏差情况下的有效性,对每个算例,将影像点坐标测量值记为 $y''_{pi}=y_{pi}\pm\delta_{yi}$, $z''_{pi}=z_{pi}\pm\delta_{zi}$,这里 y_{pi} 与 z_{pi} 为影像点坐标设定值(由正算法求得). δ_{yi}, δ_{zi} 均为服从 $N(0,\sigma^2)$ 分布的随机数,$3\sigma=\delta$,δ 为影像点坐标最大偏差量. δ_{yi}, δ_{zi} ($i=1,\cdots,n$) 相互独立,各取 3 000 个随机数,其横断面形成一组影像点偏差,总计 3 000组. 考虑到 CCD 应用技术水平[9],对非共面构型,所有算例取 $\sigma=10^{-6}$ m;对共面构型,远场算例取 $\sigma=3\times10^{-8}$ m,近场算例取 $\sigma=10^{-6}$ m.

6 种标志点构型参见图 1 和图 2. 图中圆环半径为 1.52 m;3 点 T 型与 5 点锥型的突出点距离基准面 0.6 m;分离十字型突出点距离基准面 0.6 m;共面标志点关于基准面内 y'轴与 z'轴对称分布. 矩形标志点 P_1 坐标为 $y'=1.3$ m, $z'=0.788$ m;菱形标志点 P_2 坐标为 $y'=-1.3$ m. 表 2 与表 3 分别为非共面构型与共面构型情况,限于篇幅,这里仅给出远场算例结果.

3.2　计算结果分析

大量模拟算例表明,本文提出的测距求解算法对非共面构型与共面构型普遍适用,迭代收敛快,测距与相对状态计算值与设定值偏差小.

表 2　非共面构型远场求解结果(影像点偏差 10^{-6} m)

构型	序号	$\lvert\Delta R_i\rvert_s$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta R_i\rvert_m$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta\psi\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta\theta\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta\varphi\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta T_x\rvert_m$/ m	$\lvert\Delta T_y\rvert_m$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta T_z\rvert_m$/ 10^{-3} m
3 点 T 型	1	126	95	0.30	0.31	0.08	0.13	6.39	2.26
	2	126	95	0.30	0.31	0.07	0.13	1.83	6.62
	3	127	95	0.30	0.31	0.07	0.13	2.20	2.27
	4	130	98	0.30	0.31	0.07	0.13	6.89	4.30
	5	126	95	0.29	0.31	0.07	0.13	6.49	6.56
	6	125	95	0.29	0.30	0.07	0.12	2.18	6.59
分离十字型	1	88	65	0.26	0.25	0.05	0.09	4.70	2.06
	2	88	67	0.26	0.25	0.05	0.09	1.88	4.69
	3	91	68	0.27	0.24	0.05	0.09	2.08	1.98
	4	90	67	0.26	0.24	0.05	0.09	5.04	3.22
	5	87	65	0.26	0.24	0.05	0.09	4.58	4.64
	6	88	66	0.26	0.25	0.05	0.09	2.03	4.79
5 点锥型	1	89	67	0.29	0.30	0.05	0.09	4.57	1.61
	2	88	66	0.30	0.30	0.05	0.09	1.30	4.54
	3	85	66	0.29	0.29	0.05	0.08	1.57	1.53
	4	90	68	0.29	0.29	0.05	0.09	4.75	3.01
	5	86	66	0.29	0.29	0.05	0.09	4.42	4.46
	6	87	66	0.30	0.29	0.05	0.09	1.53	4.55

表 3　共面构型远场求解结果(影像点偏差 3×10^{-8} m)

构型	序号	$\lvert\Delta R_i\rvert_s$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta R_i\rvert_m$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta\psi\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta\theta\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta\varphi\rvert_m$/ (°)	$\lvert\Delta T_x\rvert_m$/ m	$\lvert\Delta T_y\rvert_m$/ 10^{-3} m	$\lvert\Delta T_z\rvert_m$/ 10^{-3} m
长方形	1	3.9	3.1	0.061	0.061	0.005	0.004	0.193	0.052
	2	4.6	3.8	0.128	0.121	0.002	0.003	0.047	0.189
	3	4.2	3.4	0.082	0.081	0.003	0.004	0.062	0.063
	4	4.1	3.3	0.079	0.081	0.003	0.004	0.177	0.121
	5	4.3	3.5	0.095	0.095	0.006	0.004	0.198	0.194
	6	4.8	3.9	0.139	0.136	0.003	0.003	0.062	0.155
矩形	1	4.8	3.9	0.073	0.072	0.006	0.005	0.248	0.059
	2	5.0	3.9	0.162	0.145	0.003	0.003	0.063	0.156
	3	4.6	3.9	0.097	0.092	0.003	0.004	0.077	0.061
	4	5.0	4.2	0.088	0.090	0.003	0.005	0.214	0.143
	5	5.0	4.4	0.114	0.110	0.007	0.004	0.246	0.221
	6	5.4	4.3	0.170	0.158	0.003	0.003	0.082	0.160
菱形	1	4.1	3.2	0.066	0.066	0.005	0.004	0.197	0.053
	2	5.0	4.2	0.139	0.134	0.002	0.004	0.044	0.219
	3	4.3	3.5	0.089	0.087	0.003	0.004	0.061	0.066
	4	4.1	3.3	0.087	0.083	0.004	0.004	0.180	0.121
	5	4.4	3.5	0.106	0.102	0.006	0.004	0.198	0.199
	6	5.1	4.2	0.158	0.146	0.003	0.004	0.062	0.171

在影像点坐标偏差相同的情况下,非共面构型明显优于共面构型. 对非共面构型,5 点锥型测距与相对状态求解精度优于 3 点 T 型与分离十字型. 在共面构型中,正方形构型优于其它四边形.

4 结束语

本文依据计算机视觉系统的透视投影几何关系,建立标志点测距与标志点间距及影像点坐标之间的关系式;对共面标志点构型,方程式应包含标志点共面约束项. 基于这些关系式,按最小二乘问题,应用 Gauss-Newton 数值迭代法,求解标志点的测距. 获得标志点测距后,应用 QUEST 方法求解相对位置与相对姿态四元数. 这里对共面四边形构型,利用四边形对角线交点的虚影像坐标确定迭代初值. 模拟计算结果表明,本文方法对共面与非共面标志点构型普遍适用;在影像点坐标有偏差时,所得结果满足最终逼近段相对导航要求.

参考文献 (References)

[1] 朱仁璋,尹艳. 论空间交会最终平移段制导设计[J]. 中国空间科学技术,2004, 24(5):1-8
Zhu Renzhang, Yin Yan. Guidance strategy design for the final translation of space rendezvous[J]. Chinese Space Science and Technology, 2004, 24(5): 1-8(in Chinese)

[2] 朱仁璋,汤溢,尹艳. 空间交会最终平移轨迹安全模式设计[J]. 宇航学报,2004, 25(4): 443-448
Zhu Renzhang, Tang Yi, Yin Yan. Safety mode design of final translation trajectories of space rendezvous[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(4): 443-448 (in Chinese)

[3] 朱仁璋,尹艳,汤溢. 空间交会最终平移段控制策略. 中国空间科学技术[J],2005, 25(4): 31-38
Zhu Renzhang, Yin Yan, Tang Yi. The control strategy for the final translation of space rendezvous[J]. Chinese Space Science and Technology, 2005, 25(4): 31-38 (in Chinese)

[4] Mukundan R, Ramakrishnan K R. A quaternion solution to the pose determination problem for rendezvous and docking simulations[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1995, 39(2): 143-153

[5] Calboun P, Dabney R. A solution to the problem of determining the relative 6DOF state for spacecraft automated rendezvous and docking[C]// Fowski W J, Birnbaum M M. Proceedings of SPIE Space Guidance, Control and Tracking II. Orlando USA: SPIE Press, 1995: 175-184

[6] 黄玉明,周世安,王立新,等. 目标航天器位置姿态的光学测量[J]. 宇航学报,1993, 14(1): 97-103.
Huang Yuming, Zhou Shian, Wang Lixin, et al. Optical measurement for the position and attitude of the target spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 1993, 14(1): 97-103(in Chinese)

[7] Ho C-C J, McClamroch N H. Automatic spacecraft docking using computer vision-based guidance and control techniques[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1993, 16(2): 281-288

[8] Shuster M D, Oh S D. Three-axis attitude determination from vector observation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1981, 4(1): 70-77

[9] 王庆有,何在新,张以谟,等. CCD 应用技术发展动向[J]. 光电子技术与信息, 1994, 7(2): 2-6
Wang Qingyou, He Zaixin, Zhang Yimo, et al. Development of CCD application techniques[J], Optoelectronic Technology & Information, 1994, 7(2): 2-6 (in Chinese)

(责任编辑:张 婧)