光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.04.019

基于精确模型和逆投影的超大视场红外图像畸变校正

陈一超[1]，邓　超[1*]，张　瑜[2]，李晓燕[3]

（1. 武警部队研究院 系统工程研究所，北京 100012；2. 军事科学院系统工程研究院 总体研究所，北京 100012；
3. 武警北京市总队参谋部通信大队，北京 100000）

摘　要： 针对超大视场红外图像畸变大、与人眼视觉差异明显的问题，提出了一种基于精确模型和逆投影的超大视场红外图像畸变校正算法以改善其视觉效果。该算法首先利用精确模型对超大视场红外相机成像中的物、像关系进行描述；然后，针对红外图像像素采样率不高的缺点，利用较为精确的三次卷积插值法对图像进行插值来补全成像信息；最后，根据校正图像上的待赋值像点的坐标，结合校正模型和超大视场红外相机精确模型，计算该像点逆投影到插值图像时的对应坐标，并以最近邻像点像素值作为校正后图像像点的赋值。车载道路场景下的超大视场红外图像畸变校正实验结果显示，所提出的算法图像校正结果边界清晰、无锯齿效应，对场景中的直线平均还原偏差小于0.35 pixels，表明该算法对超大视场红外图像畸变校正具有较好的适用性。

关键词： 机器视觉；超大视场；红外成像；畸变校正

中图分类号： TP394.1；TH691.9　**文章编号：** 1001－5868(2021)04－0546－05

Ultra-wide FOV Infrared Image Distortion Correction Based on Accurate Model and Back-projection

CHEN Yichao[1], DENG Chao[1], ZHANG Yu[2], LI Xiaoyan[3]

（1. Systems Engineering Institute, CAPF Research Institute, Beijing 100012, CHN;
2. Academy of Military Sciences, General Research Institute of Systems Engineering Research Institute, Beijing 100012, CHN;
3. Communication Brigade of Staff Department of PAP Beijing, Beijing 100000, CHN）

Abstract: In order to solve the problems of large distortion of ultra-wide field of view (FOV) infrared image and obvious difference from human vision, in this paper, an ultra-wide FOV infrared image distortion correction algorithm is proposed based on accurate model and back-projection. The algorithm first describes the relationship between object point and image point in the ultra-wide FOV infrared camera imaging by using the accurate model. Then, aiming at the disadvantage of low sampling rate of infrared image pixels, the more accurate cubic convolution interpolation method is used to interpolate the image for completing the imaging information. Finally, according to the point coordinates of corrected image, combined with the correction model and the accurate model, the corresponding coordinates on the ultra-wide FOV infrared image point coordinates are calculated by backward projection. The pixel value of the nearest image point is used as the value of the corrected image point. The experimental results show that the proposed algorithm has clear boundary and no sawtooth effect, and the average restoration error of the straight line in the scene is less than 0.35 pixels, which indicates that the algorithm has excellent applicability for the distortion correction of the ultra-wide FOV infrared image.

Key words: machine vision; ultra-wide FOV; infrared imaging; distortion correction

收稿日期：2021－05－18.
基金项目：国家自然科学基金项目(61801507).
* **通信作者：**邓　超

0　引言

相比传统可见光以及红外小视场两种成像方式，超大视场红外成像具有视野大、环境适应性好、隐蔽性高等优势[1]，在目标检测、智能驾驶以及机器人视觉等应用领域具有独特作用[2-3]。超大视场成像方式采用“非相似”成像原理进行设计[4]，虽然其物、像仍然满足一对一关系，但发生了较为明显的畸变，且这种畸变会随着镜头视场的增大而变得更为明显。因此超大视场红外图像并不符合人眼视觉习惯，在实际应用中通常需要进行畸变校正。

图像畸变校正多集中于可见光成像领域，常用方法包括模型图像畸变校正和基于相机标定的图像畸变校正两类[5]，相对而言，后者校正精度较高，在机器视觉领域应用更为广泛[6]。传统做法是根据相机实际模型和校正后虚拟成像模型将原始图像像点在校正图像上一一对应进行投影。然而这种做法对超大视场相机而言适用性不佳。首先，一般模型对超大视场红外相机的成像描述并不准确，这就导致校正结果容易产生偏差。其次，由于畸变校正后的图像与原始图像并不是一一对应关系，因此校正图像将不可避免地出现空点，一般是利用相邻像素信息对其进行插值处理，而插值准确性受插值算法影响较大，最近邻插值法等[7]方法对于采样较为稀疏的红外超大视场红外图像的插值准确性不高。

为实现超大视场红外图像的准确校正，本文提出了一种基于精确模型逆投影的超大视场红外图像畸变校正方法。该方法首先利用精确模型对超大视场相机成像过程进行描述，并针对红外图像像素采样率低的缺点，利用三次卷积插值法对图像进行插值以补全其完整信息。然后，根据校正模型将校正图像上的待赋值像点坐标，结合相机实际成像模型标定参数结果，计算逆投影到插值图像时的坐标，并以最近邻像点像素值作为校正后图像像点的赋值。实验结果表明，本文所提出的方法图像校正结果准确、自然，无锯齿状等明显缺陷。

1　相机模型

“非相似”成像原理为镜头设计时所依照的理论，实际设计加工出镜头的物像关系并不能严格满足其所依据的设计思想，而是存在一定的成像畸变。镜头成像畸变的结果是使理想像点在径向和切线方向产生偏移分量。研究表明，超大视场镜头的径向畸变远大于切向畸变，由于畸变实际类型较多且都是非线性关系，考虑切线畸变会引入过多的非线性参数，对于标定精度的提高极为有限且会引起解的不稳定性。本文利用 Scaramuzza 提出的全景相机模型对超大视场红外系统成像过程进行描述[8]，这种模型的优点在于忽略镜头畸变在切线方向的分量，对于超大视场相机、视场大于 180°的全景相机和鱼眼相机都具有良好的适用性，且能以较小的计算量达到较高的物像关系描述精度。

红外超大视场系统成像模型如图 1 所示，以图像左上角为原点、水平方向和竖直方向分别为 X，Y 轴建立图像坐标系 O_i-UV；以光轴与探测器平面的交点为原点、X，Y 轴与图像坐标系 O_i-UV 同向建立探测器平面坐标 O_c-$U'V'$；以光轴方向为 Z 轴、镜头中心为原点、XOY 平面平行于 O_c-$U'V'$ 平面建立世界坐标系 O-XYZ。设 $\boldsymbol{S}$ 为坐标系 O-XYZ 中物点 $M(x,y,z)$ 的方向矢量，$\boldsymbol{m}=[u,v]^{\mathrm{T}}$ 是像点在图像平面坐标上的最终投影点坐标矩阵，并且其在探测器平面上对应的坐标为 $\boldsymbol{m}'=[u',v']^{\mathrm{T}}$。则这两点满足转换关系 $\boldsymbol{m}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{m}'+\boldsymbol{o}_c$：

$$\begin{bmatrix}u\\v\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}c & d\\e & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u'\\v'\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_o\\v_o\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 是对探测器坐标到像平面坐标数字化过程中微小错位的描述；矩阵 $\boldsymbol{o}_c=[u_o,v_o]^{\mathrm{T}}$ 是图像平面坐标与光轴交点坐标值，即图像畸变中心坐标。利用函数 g 表示探测器坐标系中点 $\boldsymbol{m}'=[u',v']^{\mathrm{T}}$ 到物点方向矢量 $\boldsymbol{S}$ 的映射关系：

$$\lambda g(\boldsymbol{m})=\lambda(u',v',f(\rho))=\boldsymbol{S} \tag{2}$$

式中，λ 为比例系数，ρ 为像面坐标系 O_c-$U'V'$ 中点 $\boldsymbol{m}'=[u',v']^{\mathrm{T}}$ 到坐标系原点 O_c 的距离，即 $\rho=\sqrt{u'^2+v'^2}$。

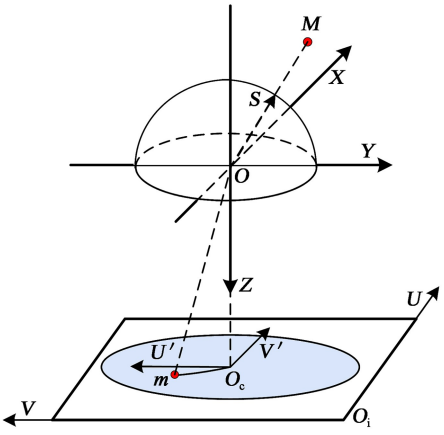


图 1　全景相机模型成像示意图

该模型中认为系统光轴垂直于探测器平面，这种假设对于绝大多数超大视场成像系统是适用的。根据成像系统镜头和投影模型种类，函数 f 可以有不同类型，通常采用泰勒公式对其进行展开：

$$f(\rho)=a_0+a_1\rho+a_2\rho^2+\cdots+a_n\rho^n \tag{3}$$

式中，$a_0,a_1,a_2,\cdots,a_n$ 为多项式系数，n 为多项式阶数。泰勒展开的本质是将像高和畸变的径向分量做高阶多项式拟合，从而提高模型的准确性和通用性。

由于在物点入射角度为 0°时，等距投影像高和各类畸变在径向上分量与入射角度的导数为 0，因此 f 始终满足：

$$\left.\frac{f(\rho)}{\partial\rho}\right|_{\rho=0}=0 \tag{4}$$

则式(3)转化为

$$f(\rho)=a_0+a_2\rho^2+a_3\rho^3+\cdots+a_n\rho^n \tag{5}$$

一般 $n=4$ 时模型就能达到足够的标定精度且计算量适中。通用模型中的待标定参数为 $\boldsymbol{A},\boldsymbol{o}_c,a_0,a_2,a_3,a_4$，并且这些参数为超大视场红外相机固有参数，称为内参数。通过相机标定求解相机内参数，即能够得到相机成像中的物、像精确数学关系。

2 逆投影畸变校正

畸变校正的本质是利用一种目标图像成像模型对原图像实际成像模型进行映射变换，本文所提出的基于精确模型和逆投影的超大视场红外图像畸变校正算法主要分四步：

(1)逆投影：根据实际目标图像成像模型，逆投影目标图像像点在相机坐标系中的空间点坐标；

(2)正投影：根据原图像实际成像模型，目标图像像点所对应空间点坐标正投影到原图像坐标系中，计算对应原图像中对应点的坐标，从而建立目标图像像点与原图像像点的灰度映射关系；

(3)图像插值：利用三次卷积插值法对原图像进行插值放大处理；

(4)灰度赋值：根据图像放大倍数，对目标图像像点映射的原图像像点坐标取整，并对其灰度进行赋值。

2.1 投影变换原理

通常目标图像成像模型是为了对更符合人眼视觉习惯或匹配显示模块，不同畸变校正方式仅区别于重投影成像模型的不同。根据实际应用情况，采用等距投影模型对超大视场红外图像进行校正。

图 2 所示为超大视场图像畸变校正投影变换原理示意图：O_{ai}-$U_{ai}V_{ai}$ 为目标图像所处平面，该平面与原图像平面 O_i-UV 平行；面 O_{ai}-$U_{ai}V_{ai}$ 与相机坐标系 O-XYZ 的 Z 轴相交于点(0,0,$-f$)，f 即为目标图像等距投影焦距，并设该点坐标为(m,n)；p_c 为目标图像上坐标为(i_c,j_c)的像点，则点 p_c 在相机坐标系中的坐标为$(i_c-m,j_c-n,-f)$，由式(2)有：

$$\lambda(u',v',f(\rho))=(i_c-m,j_c-n,-f) \tag{6}$$

将上式代入式(5)，式(5)转化为

$$\frac{-f}{\sqrt{(i_c-m)^2+(j_c-n)^2}}\rho=a_0+a_2\rho^2+a_3\rho^3+\cdots+a_n\rho^n \tag{7}$$

式(7)的最小实数根即为 ρ 的最终解。

点 p_c 在像面 O_i-UV 上的逆投影点 p 的坐标(i,j)为

$$\begin{bmatrix}i\\j\end{bmatrix}=\mathrm{round}\left(\frac{S_f}{\sqrt{(i_c-m)^2+(j_c-n)^2}}\otimes\begin{bmatrix}c&d\\e&1\end{bmatrix}\rho\begin{bmatrix}i_c-m\\j_c-n\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}u_o\\v_o\end{bmatrix}\right) \tag{8}$$

式中，round 表示取整，S_f 表示插值后图像与原图像的比例系数。

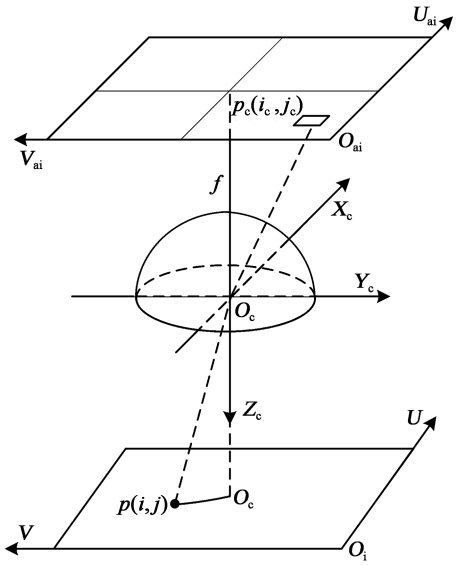


图 2 畸变校正投影变换原理示意图

2.2 三次卷积插值

图像插值算法种类较多，如相邻插值、双线性插值和三次卷积插值等，其中三次卷积插值法能够通过适当的计算量得到最精确的插值[9]，对探测器分辨率不高的红外图像适用性较好。

假定函数 $S(x)$是区间$[a,b]$上定义的多项式，每个子区间$[x_{i-1},x_i]$的阶数不超过 3，且 $S(x)$，$S'(x)$和 $S''(x)$为连续函数。如果满足插值条件 $S(x_i)=f(x_i),i=0,1,\cdots,n$，则 $S(x)$是 $f(x_i)$三次样条插值函数的代码 $x_0,x_1,\cdots,x_n$。为了使 $S(x)$接近最佳插值函数，设：

$$S(\omega)=\begin{cases}1-2|\omega|^2+|\omega|^3, & |\omega|<1\\ 4-8|\omega|+5|\omega|^2+|\omega|^3, & 1\leqslant|\omega|\leqslant 2\\ 0, & |\omega|>2\end{cases} \tag{9}$$

式中，ω 是插值节点。

三次卷积插值的矩阵表示公式为

$$F(m,n)=\begin{bmatrix}s(1+v)\\ s(v)\\ s(1-v)\\ s(2-v)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}f(i-1,j-1) & f(i-1,j) & f(i-1,j+1) & f(i-1,j+2)\\ f(i,j-1) & f(i,j) & f(i,j+1) & f(i,j+1)\\ f(i+1,j-1) & f(i+1,j) & f(i+1,j+1) & f(i+1,j+1)\\ f(i+2,j-1) & f(i+2,j) & f(i+2,j+1) & f(i+2,j+2)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s(1+u)\\ s(u)\\ s(1-u)\\ s(2-u)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中，$F(m,n)$为插值点灰度值，$f(i,j)$为待插值图像的像素值，u,v 分别为 m,n 的分数部分。

3　实验与分析

3.1　畸变校正实验

实验利用图 3 所示的超大视场红外相机开展，相机镜头采用“等距投影”原理并以水平视场 140°为目标进行设计，探测器单像元尺寸为 12 μm，图像输出分辨率为 800×600。利用文献[10]的方法进行标定，其成像参数如表 1 所示：反投影误差为 0.24 pixels，表明相机标定精度较高。

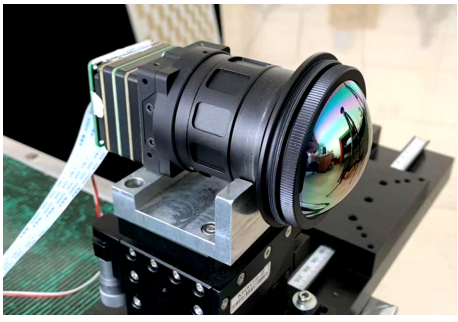
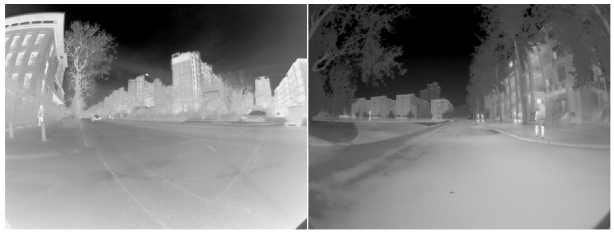


图 3　超大视场红外相机

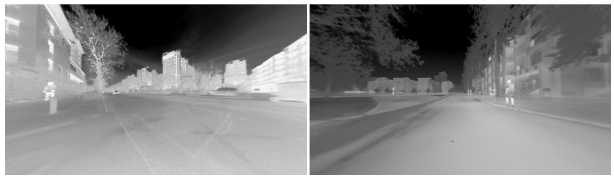
表 1　超大视场红外相机成像参数

参数	数值
$\boldsymbol{A}$	$[0.999\,8,-2.607\,8\times10^{-5},1.546\,8\times10^{-4},1]$
$\boldsymbol{o}_c$	$[296.261\,2;413.285\,7]$
(a_0,a_2,a_3,a_4)	$(-319.078\,9,0.001\,0,2.312\,5\times10^{-7},6.269\,0\times10^{-10})$

将本课题中超大视场红外相机应用于车载辅助驾驶系统中，图 4(a)展示了超大视场红外成像下的道路场景，可以看出超大视场红外相机对热目标更敏感，能够有效实现对大视场范围区域内的场景感知。但同时，由于非相似成像畸变较大，图像中建筑等物体存在明显扭曲，所成影像与人眼视觉存在较大差异。利用本文所提出的畸变校正方法对场景图像进行校正：为使原始图像像点尽可能应用的同时减小插值像点数量，将目标图像等距投影焦距 f 设置为 509.7 pixels，校正图像视场为 132.2°×103.8°($H\times V$)。最终校正结果如图 4(b)所示：可以看出，校正图像中的成像畸变得到了较好地校正，并且校正图像中目标成像边界较为清晰，无锯齿效应，灰度变化更为流畅自然，图像整体与人眼视觉符合情况较好。



(a)　场景图像



(b)　校正图像

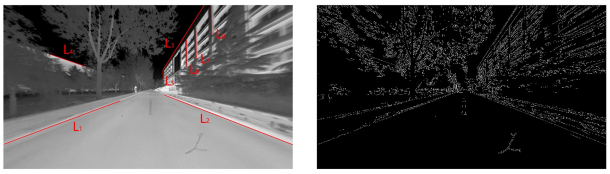
图 4　超大视场红外场景图像校正

3.2　分析与对比

为验证本文所提出方法对超大视场红外图像畸变校正的有效性，对图 5(a)中的超大视场红外图像校正结果利用 Canny 算子进行边缘检测，结果如图 5(b)所示。由边缘检测结果可以看出，校正场景图像中目标的线性保持较好，表明畸变校正结果与实际情况符合程度较高。

为客观评价综合畸变校正结果，对场景图像的道路边界、楼房边界等多条自然线条(如图 5(a)所示)进行数学直线拟合[11]，并将边缘检测结果和拟

合直线投影至超大视场红外图像中，测量其直线拟合偏差，结果如表 2 所示：对任意直线而言，校正结果中成像点与拟合的理想直线之间的平均误差小于 0.35 pixels，90%的偏差在 0.78 pixels 范围之内，标准差小于 0.34 pixels。这表明，本文所提出的畸变校正方法对超大视场红外图像具有较好的校正效果，能够满足较高精度的畸变校正要求。



(a) 校正图像 (b) 边缘检测

图 5 场景校正图像及其边缘检测结果

表 2 直线校正结果评价(单位:pixels)

直线	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6	L_7	L_8
平均误差	0.33	0.16	0.20	0.12	0.35	0.21	0.13	0.11
90%偏差分布范围	0.78	0.33	0.42	0.23	0.67	0.35	0.22	0.21
标准差	0.30	0.12	0.15	0.08	0.34	0.14	0.06	0.07

4 总结

针对传统畸变校正方法对超大视场红外相机畸变校正适应性不高的问题，本文提出了基于精确模型和逆投影的畸变校正算法：该算法利用精确模型对超大视场相机成像过程进行描述，利用三次卷积插值法对图像进行插值以补全其完整信息；然后根据校正模型将校正图像上的待赋值像点坐标，结合相机实际成像模型标定参数结果计算逆投影到插值图像时的坐标，并以最近邻像点像素值作为校正后图像像点的赋值。实验结果表明，超大视场红外图像经该算法畸变校正后成像边界较为清晰、无锯齿效应，并且对直线目标的最终校正精度达到亚像素级。基于精确模型和逆投影的畸变校正算法的提出，将促进超大视场红外成像方式在机器视觉领域更为广泛的应用。

参考文献：

[1] 王子昂，黄富瑜，刘秉琦，等. 大视场摄像机标定方法研究进展[J]. 半导体光电，2019，40(3)：303-308.
Wang Ziang, Huang Fuyu, Liu Bingqi, et al. Research progress of camera calibration methods with large field of view [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 303-308.

[2] Chen Yichao, Huang Fuyu, Liu Bingqi, et al. Significant obstacle location with ultra-wide FOV LWIR stereo vision system[J]. Optical and Lasers in Engin., 2020, 129: 106076.

[3] 张 帅，刘秉琦，黄富瑜，等. 超大视场红外凝视成像技术及其应用浅析[J]. 激光与红外，2016，46(10)：1176-1182.
Zhang Shuai, Liu Bingqi, Huang Fuyu, et al. Super wide field of view staring infrared imaging technology and its application [J]. Laser and Infrared, 2016, 46(10): 1176-1182.

[4] 陈 琛. 曲面幕投影系统中非相似成像技术研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2017.
Chen Chen. Research on non-similar imaging technology in the quadric screen projection system[D]. Qing Huangdao: Yanshan University, 2017.

[5] 魏利胜，周圣文，张平改，等. 基于双经度模型的鱼眼图像畸变矫正方法[J]. 仪器仪表学报，2015，36(2)：377-385.
Wei Lisheng, Zhou Shengwen, Zhang Pinggai, et al. Double longitude model based correction method for fish-eye image distortion[J]. Chinese J. of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 377-385.

[6] 覃 丹，崔 岩，刘兴林. 基于经纬映射与透视投影的球形图像校正[J]. 计算机技术与发展，2020，30(11)：94-99.
Qin Dan, Cui Yan, Liu Xinglin. Spherical image correction based on latitude and longitude mapping and perspective projection[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(11): 94-99.

[7] 吕耀文，安 喆，徐熙平. 鱼眼视频图像畸变的实时校正方法[J]. 吉林大学学报(理学版)，2017，55(1)：103-108.
Lv Yaowen, An Zhe, Xu Xiping. Real-time correction method for fisheye video images distortion[J]. J. of Jilin University (Science Edi.), 2017, 55(1): 103-108.

[8] Urban S, Leitloff J, Hinz S. Improved wide-angle, fisheye and omnidirectional camera calibration [J]. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 2015, 108: 72-79.

[9] 张晓阳. 红外遥感图像超分辨率重建算法研究[D]. 长春：中国科学院大学，2019.
Zhang Xiaoyang. Research on super resolution reconstruction algorithm of infrared remote sensing image[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.

[10] Chen Yichao, Huang Fuyu, Liu Bingqi, et al. Plane chessboard-based calibration method for a LWIR ultra-wide-angle camera[J]. Appl. Opt., 2019, 148: 106893.

[11] 吴 军，王玲容，黄明益，等. 多几何约束下的鱼眼相机单像高精度标定[J]. 光学学报，2018，38(11)：1115001.
Wu Jun, Wang Lingrong, Huang Mingyi, et al. High precision calibration of fisheye camera with single image under multiple geometric constraints[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1115001.

作者简介：

陈一超(1991－)，男，安徽淮南人，博士，工程师，主要研究方向为军用光电系统设计和系统工程；

邓 超(1983－)，男，博士，正高级工程师，研究方向为系统工程。