

# 基于成像区域模型的工业相机视场角优化配置方法

易遵辉<sup>1,2</sup>, 蒋朝辉<sup>1†</sup>, 陈晓方<sup>1</sup>, 桂卫华<sup>1</sup>

(1. 中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学 信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 工业相机视场角的优化配置对提升目标的图像质量有重要作用, 然而, 目前视场角的配置存在一定盲目性, 导致图像传感器的像素被大量浪费. 为此, 本文提出了一种基于成像区域模型的工业相机视场角优化配置方法. 首先, 建立空间三维坐标系以定量描述工业成像场景; 然后, 基于空间坐标变换建立成像区域模型, 揭示工业相机的视场角、成像方向和成像区域的定量关系; 最后, 设计基于二分-粒子群的视场角优化配置算法, 实现以最小视场角获取完整目标图像. 实验结果表明, 利用本文方法优化配置视场角后, 图像传感器的像素得到充分利用, 图像质量明显提高, 可为工业相机视场角的选型提供可靠参考.

**关键词:** 成像区域; 工业相机; 视觉传感技术; 视场角; 优化配置

**引用格式:** 易遵辉, 蒋朝辉, 陈晓方, 等. 基于成像区域模型的工业相机视场角优化配置方法. 控制理论与应用, 2025, 42(4): 679–687

DOI: 10.7641/CTA.2023.30122

## Optimal configuration method for field angle of industrial cameras based on imaging area model

YI Zun-hui<sup>1,2</sup>, JIANG Zhao-hui<sup>1†</sup>, CHEN Xiao-fang<sup>1</sup>, GUI Wei-hua<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

**Abstract:** The optimal configuration of the field angle of industrial cameras plays an important role in improving the image quality of targets. However, there is a certain blindness in the configuration of field angle, which leads to a large number of wasted pixels of image sensors. To this end, an optimal configuration method for field angle of industrial cameras based on the imaging area model is proposed. Firstly, establishing a three-dimensional coordinate system in space to quantitatively describe the industrial imaging scene. Then, an imaging area model is established based on the spatial coordinate transformation to reveal the quantitative relationship among the field angle, imaging direction and imaging area of industrial cameras. Finally, an optimization configuration algorithm for field angle based on the bisection-particle swarm is designed to obtain the image of the complete target by the minimum field angle of industrial cameras. The experimental results show that after using the proposed method to optimize the configuration of field angle, the pixels of image sensors are fully utilized, and the image quality is significantly improved, which can provide a reliable reference for the selection of the field angle of industrial cameras.

**Key words:** imaging area; industrial camera; vision sensing technology; field angle; optimal configuration

**Citation:** YI Zunhui, JIANG Zhao-hui, CHEN Xiaofang, et al. Optimal configuration method for field angle of industrial cameras based on imaging area model. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(4): 679–687

## 1 引言

随着光学成像设备的成熟和图像处理技术的发展, 视觉传感技术凭借其实时、直观及非接触等优势被广泛应用于工业领域, 以检测过程关键参数和监控设备运行状态<sup>[1-2]</sup>. 在视觉传感技术的工业应用中, 工业相

机获取的目标图像是检测和监控的数据来源和信息基础. 工业相机的性能参数决定了获取图像的质量, 对其进行优化配置是提升视觉传感技术应用效果的可靠途径<sup>[3-4]</sup>. 其中, 视场角是决定工业相机成像区域大小的关键参数, 对目标成像的质量有重要影响. 视

收稿日期: 2023-03-09; 录用日期: 2023-12-07.

†通信作者. E-mail: jzh0903@csu.edu.cn; Tel.: +86 15874291486.

本文责任编辑: 李少远.

国家重大科研仪器研制项目(61927803), 国家自然科学基金项目(62133016)资助.

Supported by the National Major Scientific Research Equipment of China (61927803) and the National Natural Science Foundation of China (62133016).

场角过大,大量目标以外的其他无效区域被工业相机成像,造成图像传感器的像素被浪费,不仅增加了剔除无效区域等图像处理的工作,还降低了图像中目标的分辨率<sup>[5-7]</sup>,视场角过小,工业相机的成像区域无法完全覆盖目标区域,难以获取到完整的目标图像,造成图像数据提供的信息不够全面,应用效果大打折扣<sup>[8-9]</sup>。因此,优化配置工业相机的视场角,使工业相机的成像区域与目标区域实现最佳匹配,既能获取全面的目标图像,确保信息的完备性,又能充分利用图像传感器的像素,提高目标图像的质量,这对提升参数检测和状态监控等应用的效果、推动视觉传感技术在工业领域的进一步发展具有重要意义。

目前,工业相机视场角的配置方法大多是人工根据目标的高度和宽度进行简单估算<sup>[10-12]</sup>,存在较大的随机性和盲目性,致使工业相机的成像区域与目标区域不匹配,图像传感器的性能未能得到充分利用,对后续基于图像信息的检测或监控算法的应用效果产生不利影响。另一种方法是采用平移倾斜缩放(pantilt-zoom, PTZ)相机<sup>[13]</sup>,通过变焦镜头和多自由度云台调整相机的视场角和成像方向,从而使工业相机的成像区域与目标区域匹配<sup>[14]</sup>。但工业现场往往环境恶劣,存在强震动干扰<sup>[15-16]</sup>。PTZ相机不仅硬件成本较高,还具有机械传动结构,在震动环境中会导致相机失焦,故其难以应用于工业领域。因此,亟需研究优化配置工业相机视场角的新思路和新方法,以便提前指导普通工业相机定焦镜头的选型,实现成像区域与目标区域的匹配。然而,工业相机视场角的优化配置存在以下难点:1)在不同应用场景中,目标区域的大小和形状不同,难以用统一的数学方程进行量化描述;2)工业相机的成像区域由视场角、成像方向和安装位置等多个因素共同决定,难以建立能够准确表征工业相机成像区域的模型。虽然在视频传感器网络领域中,已有不少相机成像区域模型被建立用于优化相机网络的覆盖范围,但是这些模型均有其局限性,难以应用于视场角的配置。如文献[17]建立的基于扇形的成像区域模型以及文献[18]建立的基于三角形的成像区域模型,两者均为二维模型,无法表征三维空间的成像区域;文献[19]建立了基于圆锥向外辐射的三维成像区域模型,理论上能够表征工业相机的成像区域,但由于图像传感器为矩形,工业相机的成像区域应为四棱锥向外辐射;文献[20]建立了基于棱锥向外辐射的三维成像区域模型,然而其没有考虑成像方向的变化对成像区域的影响,不适用于成像方向能够灵活变化的场景。

为了弥补上述不足,克服工业相机视场角优化配置存在的难点,本文提出了一种基于成像区域模型的工业相机视场角优化配置方法,能够实现成像区域与目标区域的最佳匹配。主要贡献如下:

1) 提出了基于场景坐标系的成像场景描述体系,利用点坐标、旋转角度和点坐标集合等形式实现了工业相机的安装位置、成像方向和目标区域的定量描述;

2) 建立了基于空间坐标变换的成像区域模型,揭示了工业相机的视场角、成像方向和成像区域之间的定量关系;

3) 设计了基于二分-粒子群的视场角优化配置算法,通过优化工业相机的成像方向配置出了满足成像区域与目标区域完全匹配的最佳视场角。

本文的其余内容组织如下:第2节建立了工业相机的成像区域模型;第3节设计了视场角的优化配置算法;第4节展示了本文方法的可靠性和有效性;第5节为本文的结论部分。

## 2 工业相机成像区域模型

本节首先建立空间三维坐标系对成像场景进行量化描述,然后在此基础上提出了基于空间坐标变换的成像区域模型的建立方法。

### 2.1 成像场景的量化描述

在视觉传感技术的工业应用中,工业相机通常用于获取某一特定目标区域的图像数据,以便实时在线监控目标的运行状态或通过图像数据提取其他所需的目标信息。工业相机的成像区域由安装位置、成像方向和视场角等参数决定。受工业现场环境限制,可供选择的安装位置一般较为确定,而成像方向在安装阶段可自由调整。只有视场角必须在相机的选型阶段确定,一旦配置好,只能通过更换镜头或者采用成本更高和应用环境要求更严格的变焦镜头进行更改。

为了优化配置工业相机的视场角,使成像区域与目标区域达到最佳匹配,本文首先建立空间三维坐标系对工业相机的安装位置、成像方向和目标区域等成像场景的要素进行量化描述。一个典型的视觉传感技术工业应用场景如图1所示,本文分别以工业相机的光心、水平目标方向和竖直方向作为原点、 $Z_W$ 轴和 $X_W$ 轴建立场景坐标系 $O_W-X_WY_WZ_W$ 。因此,工业相机的安装位置可用原点坐标 $(0, 0, 0)$ 表示;成像方向可用绕 $X_W$ 轴旋转角度 $(r_x)$ 、绕 $Y_W$ 轴旋转角度 $(r_y)$ 和绕 $Z_W$ 轴旋转角度即自身旋转角度 $(r_z)$ 表示。

由于不同的应用场景中成像的目标各不相同,目标区域的形状和大小均有较大区别,故难以使用通用的数学方程进行量化描述。本文提出了利用目标轮廓上的离散点集合 $(\Omega_T)$ 来表示目标区域的思路,如式(1)所示:

$$\Omega_T = \{t_i(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, \dots, n\}, \quad (1)$$

式中: $t_i(x_i, y_i, z_i)$ 为目标轮廓上第*i*个点的场景坐标; $n$ 是能表征整个目标区域的离散点数量。当工业相机

的安装位置确定后,在场景坐标系中的目标轮廓的离散点集合即可确定。

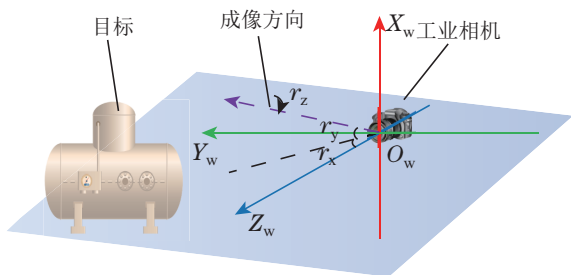


图1 典型的工业成像场景示意图

Fig. 1 Schematic of a typical industrial imaging scene

### 2.2 成像区域模型的建立

工业相机由镜头和图像传感器构成,其结构如图2所示。物体的光信号经由镜头聚焦传输至图像传感器,然后被图像传感器中的光电转换模块和量化模块转换成电信号和数字信号。光信号的接收范围是一个圆锥向外辐射,其大小由镜头视场角决定。但用于转换光信号的图像传感器通常为矩形,因此工业相机实际的成像区域形状是一个如图3所示的四棱锥向外辐射,其大小由水平视场角( $\omega_h$ )和竖直射场角( $\omega_v$ )共同决定。本文提出了该成像区域在相机坐标系下的数学描述方程,如式(2)所示:

$$\begin{cases} -\tan \frac{\omega_v Z_C}{2} \leq X_C \leq \tan \frac{\omega_v Z_C}{2}, \\ -\tan \frac{\omega_h Z_C}{2} \leq Y_C \leq \tan \frac{\omega_h Z_C}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

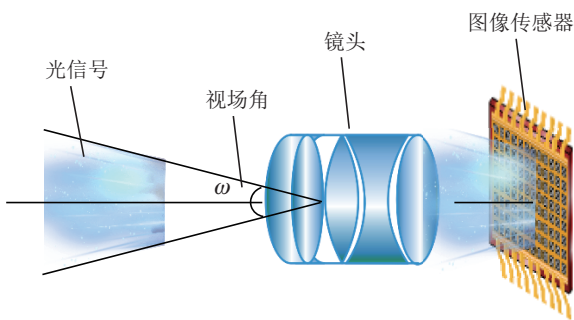


图2 工业相机的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of an industrial camera

由于图像传感器的矩形一般需要内接于镜头的成像圆形以充分发挥两者的性能,因此工业相机的水平视场角和垂直视场角与镜头的视场角( $\omega$ )(即对角线视场角)存在如下关系:

$$\begin{cases} \tan \frac{\omega_v}{2} = \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega}{2}, \\ \tan \frac{\omega_h}{2} = \frac{k^2}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k$ 为图像传感器的长宽比。

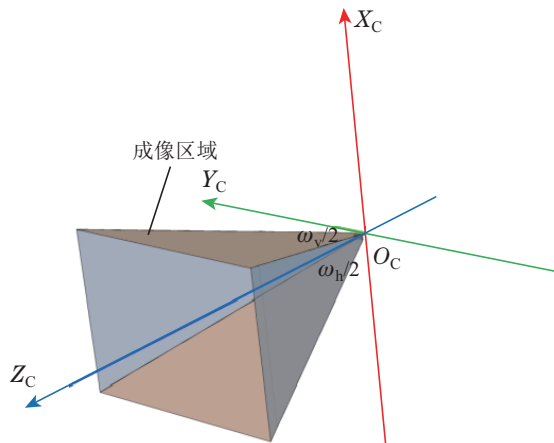


图3 相机坐标系下的工业相机成像区域

Fig. 3 Imaging region of an industrial camera in camera coordinate system

将式(3)代入式(2)中,即可描述镜头视场角和工业相机成像区域大小的定量关系,如式(4)所示:

$$\begin{cases} \frac{-1}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega Z_C}{2} \leq X_C \leq \frac{1}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega Z_C}{2}, \\ \frac{-k^2}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega Z_C}{2} \leq Y_C \leq \frac{k^2}{\sqrt{1+k^2}} \tan \frac{\omega Z_C}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

为进一步定量描述工业相机的安装位置和成像方向对成像区域的影响,本文利用空间坐标变换将相机坐标系下的成像区域方程向场景坐标系转换,从而建立起场景坐标系下的工业相机成像区域模型。相机坐标系与场景坐标系的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = R_Z R_Y R_X \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} - T, \quad (5)$$

式中: $R_X$ ,  $R_Y$ 和 $R_Z$ 分别是绕 $X_W$ 轴、 $Y_W$ 轴和 $Z_W$ 轴的旋转矩阵,由成像方向决定; $T$ 为平移矩阵,由安装位置决定,由于场景坐标系的原点为工业相机的光心,因此相机坐标系与场景坐标系的原点重合;它们的具体取值为

$$\begin{cases} R_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r_x & -\sin r_x \\ 0 & \sin r_x & \cos r_x \end{bmatrix}, \\ R_Y = \begin{bmatrix} \cos r_y & 0 & \sin r_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin r_y & 0 & \cos r_y \end{bmatrix}, \\ R_Z = \begin{bmatrix} \cos r_z & -\sin r_z & 0 \\ \sin r_z & \cos r_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (6)$$

联立式(4)–(6)即可得到工业相机在场景坐标系下的成像区域( $\Omega_A$ ), 即

$\Omega_A$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\tan \frac{\omega}{2}}{\sqrt{1+k^2}}(X_W \sin r_y - Y_W \cos r_y \sin r_x - \\ Z_W \cos r_x \cos r_y) \leq \\ X_W \cos r_y \cos r_z + \\ Y_W (\cos r_z \sin r_x \sin r_y - \cos r_x \sin r_z) + \\ Z_W (\cos r_x \cos r_z \sin r_y + \sin r_x \sin r_z) \leq \\ \frac{\tan \frac{\omega}{2}}{\sqrt{1+k^2}}(-X_W \sin r_y + \\ Y_W \cos r_y \sin r_x + Z_W \cos r_x \cos r_y), \\ k^2 \tan \frac{\omega}{2} \frac{\tan \frac{\omega}{2}}{\sqrt{1+k^2}}(X_W \sin r_y - Y_W \cos r_y \sin r_x - \\ Z_W \cos r_x \cos r_y) \leq \\ X_W \cos r_y \sin r_z + \\ Y_W (\cos r_x \cos r_z + \sin r_x \sin r_y \sin r_z) + \\ Z_W (-\cos r_z \sin r_x + \cos r_x \sin r_y \sin r_z) \leq \\ \frac{k^2 \tan \frac{\omega}{2}}{\sqrt{1+k^2}}(-X_W \sin r_y + \\ Y_W \cos r_y \sin r_x + Z_W \cos r_x \cos r_y). \end{array} \right. \quad (7)$$

工业相机成像区域模型揭示了视场角、成像方向和成像区域之间的定量关系. 在已知图像传感器的长宽比、视场角和成像方向时, 即可通过式(7)计算工业相机的成像区域.

### 3 视场覆盖增强算法

本节首先在上述工作的基础上对视场角优化问题进行分析, 并提出了相应的优化目标函数; 然后, 设计了一种二分-粒子群算法求解此目标函数, 以实现视场角的优化配置.

#### 3.1 优化问题分析

由上述建立的工业相机成像区域模型可知, 视场角决定了成像区域的大小, 成像方向决定了成像区域的位置. 为确保成像区域与目标区域达到最佳匹配, 从而使图像传感器的像素得到充分利用, 工业相机必须以最小的视场角获取整个目标区域的图像.

为描述工业相机成像区域对目标区域的覆盖程度, 本文定义覆盖率( $\alpha$ )来定量表示目标区域被工业相机成像区域覆盖的比例. 覆盖率的计算方法是将式(1)的目标区域轮廓点集合逐一代入式(7)的工业相机成像区域模型中, 若式子成立则此点位于成像区域内, 反之相反, 从而得到目标区域轮廓点在成像区域内的个数与总个数的比例, 即覆盖率, 计算公式为式(8), 即

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{\sum_{\Omega_T} f(t_i(x_i, y_i, z_i))}{n}, \\ f(t_i(x_i, y_i, z_i)) = \begin{cases} 1, & t_i(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_A \\ 0, & t_i(x_i, y_i, z_i) \notin \Omega_A \end{cases}. \end{array} \right. \quad (8)$$

则本文视场角优化配置的目标函数可总结如下:

$$\begin{array}{ll} \min \omega, \\ \text{s.t. } \alpha = 1. \end{array} \quad (9)$$

即在目标区域所有轮廓点都位于成像区域内的约束条件下, 配置最小的工业相机视场角.

当目标区域已知, 覆盖率只取决于工业相机的视场角和成像方向两个因素. 视场角决定了成像区域的大小, 是能否获取完整目标区域图像的基础. 在某一视场角下, 可通过优化成像方向提高覆盖率, 从而得到此视场角下的最大覆盖率, 进而判断目标区域是否被完全覆盖. 若被完全覆盖, 则可减小视场角; 若没有被完全覆盖, 则需增大视场角. 在保证目标区域都能够被成像的前提下, 通过调整成像方向不断减小视场角, 从而实现工业相机视场角的优化配置.

但由式(9)的目标函数方程可知, 无法利用常规的求导方法对目标函数进行直接求解, 因此必须针对目标函数的特点设计相应的求解算法.

#### 3.2 求解算法设计

根据上文的优化问题分析可知, 若要配置最优的工业相机视场角, 需要计算视场角为某一定值时的最大覆盖率, 以便判断目标区域在此视场角下能否被完全覆盖. 然而只有在图像传感器的长宽比、视场角和成像方向均已知的情况下, 才可由式(8)计算得到覆盖率, 无法通过求导直接得到覆盖率为最大值时的成像方向, 因此也难以使用以求导为核心的优化算法求解, 如梯度下降法、牛顿法和共轭梯度法等<sup>[21]</sup>.

穷举法和启发式算法是计算最大覆盖率的可行手段. 穷举法以确定的步骤进行遍历求解答案, 计算时间成本高; 启发式算法则是根据已有的经验规则求解答案, 计算时间大大减小, 且计算结果也较为精确. 启发式算法中的粒子群算法是一种受鸟群觅食启发、基于群体协作进行求解的算法, 具有结构简单、易于实现和收敛速度快等优点, 被广泛应用于工业领域优化问题的求解<sup>[22]</sup>. 因此, 本文利用粒子群算法计算最大覆盖率.

在上述研究的基础上, 本文设计了一种二分-粒子群算法求解视场角优化配置问题, 算法流程如图4所示, 具体步骤如下:

**步骤 1** 设置参数. 场景参数为: 目标区域点集合( $\Omega_T$ )、图像传感器的长宽比( $k$ ). 系统初始参数为: 迭代总数( $N$ )、视场角上限( $\omega_{\max}$ )和下限( $\omega_{\min}$ ). 当工

业相机的视场角为上限时, 表示目标区域能被完全成像, 而当视场角为下限时则目标区域无法被工业相机完全获取. 为方便求解, 本文将视场角的上限设置为 $256^\circ$ , 下限设置为 $0^\circ$ . 视场角配置的精度( $\delta_\omega$ )由迭代总数和视场角上下限共同决定, 如式(10)所示. 因此 $N$ 设置为8, 精度达到 $1^\circ$ , 即可满足大部分应用需求,

$$\delta_\omega = \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{2^N}. \quad (10)$$

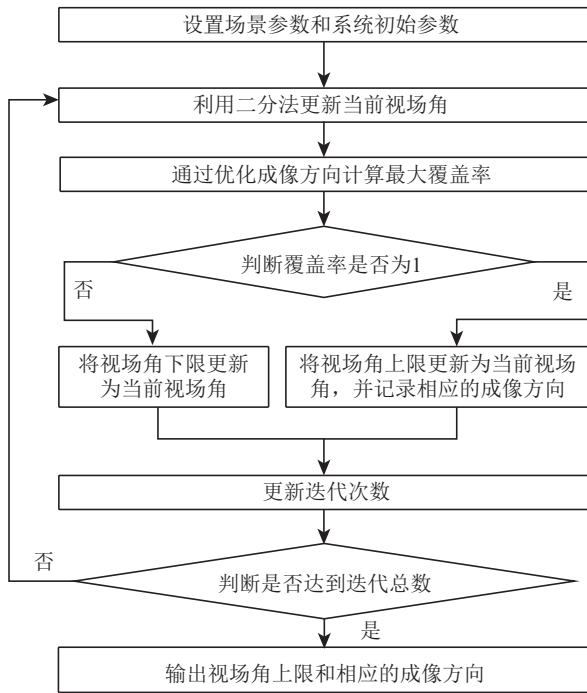


图4 二分-粒子群算法流程

Fig. 4 Flow chat of bisection-particle swarm optimization algorithm

**步骤2 更新视场角.** 为减少视场角的配置时间, 利用二分法更新工业相机的当前视场角, 更新规则如下:

$$\omega = \frac{(\omega_{\min} + \omega_{\max})}{2}. \quad (11)$$

**步骤3 计算最大覆盖率.** 以成像方向( $r_x, r_y, r_z$ )作为粒子的位置, 其取值范围是 $(-\pi/2, \pi/2)$ ; 以式(8)的覆盖率计算公式作为粒子的适应度函数. 利用粒子群优化算法计算视场角已知时的最大覆盖率, 多个粒子根据适应度值不断更新迭代, 从而搜索出当前视场角下的最大覆盖率. 粒子群的更新方式如下:

$$\begin{cases} v_{dm}^s = wv_{dm}^{s-1} + c_1r_1(p_{dm} - r_{dm}^{s-1}) + c_2r_2(g_d - r_{dm}^{s-1}), \\ r_{dm}^s = r_{dm}^{s-1} + v_{dm}^s, \quad d = x, y, z, \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $s$ 与 $s - 1$ 分别表示粒子当前状态和历史状态;  $v_{dm}$ 与 $r_{dm}$ 分别表示第 $m$ 个粒子的速度和位置;  $w$ 为惯性权重, 取非负数;  $c_1$ 与 $c_2$ 通常全部设置为2;  $r_1$ 和 $r_2$

为区间 $[0, 1]$ 中的随机数;  $p_{dm}$ 是第 $m$ 个粒子的个体最优位置;  $g_d$ 是全局最优位置; 粒子个数设置为100个, 粒子群算法终止的条件为连续5次全局最优适应度值未发生变化.

**步骤4 判断及更新.** 根据步骤3计算的最大覆盖率更新视场角的上下限: 若覆盖率为1, 将视场角上限更新为当前视场角, 下限不变, 并记录覆盖率为1时的成像方向; 若覆盖率不为1, 将视场角下限更新为当前视场角, 上限不变.

**步骤5 迭代与终止.** 迭代次数加1并判断是否达到迭代总数. 若未达到迭代总数, 返回步骤2; 若达到迭代总数则终止, 输出视场角上限和记录的相应成像方向.

将场景参数代入上述设计的二分-粒子群算法, 即可得到使成像区域与目标区域最佳匹配的视场角和相应的成像方向, 为相机的选型和安装提供指导. 需要特别说明的是, 应用本文方法需要获取目标区域的几何参数作为先验知识. 一般可以通过工业现场保存的施工图纸获取目标区域位置和尺寸, 另外也可通过激光测距仪等或智能手机直接测量目标区域的几何参数.

## 4 实验验证

本节首先通过仿真实验验证所提方法的准确性、可靠性和普适性, 然后, 通过实物实验验证本文所提方法的应用效果.

### 4.1 仿真实验

为了验证所提视场角优化配置算法的准确性, 提出了如下的验证方法: 首先, 预设一个视场角和成像方向; 其次, 利用建立的成像区域模型提取该视场角和成像方向下的成像区域与某一平面相交的4个顶点; 然后, 将4个顶点围成区域作为目标区域代入本文的优化配置算法, 并多次运行算法进行优化配置; 最后统计多次优化配置的视场角与预设视场角的误差分布. 为方便验证准确性, 将迭代次数改为10, 即视场角配置精度达到 $0.25^\circ$ . 预设的目标区域如图5所示, 由表1展示的视场角优化配置算法的误差分布统计结果可知, 本文方法的最大误差为 $0.5^\circ$ , 针对已知目标区域可有效配置工业相机的视场角.

进一步为了验证基于空间坐标变换的成像区域模型的可靠性, 利用遗传算法<sup>[23]</sup>代替优化配置方法中的粒子群算法计算最大覆盖率, 再次对图5的预设目标区域进行工业相机视场角的优化配置. 由表1统计的视场角配置误差可知, 两种算法的结果非常接近, 说明本文构建的成像区域模型非常可靠. 但粒子群算法更容易实现, 且应用在优化配置方法中的运行时间小于遗传算法, 因此本文采用粒子群算法.

为了验证所提方法对于不同形状的目标区域的适用性,在仿真软件Mathematica(科学计算软件,能够高效计算和显示函数图形)中设置了如图6(a)所示的圆柱体目标区域和如图6(c)所示的不规则立体目标区域,目标区域的相关参数在相应的图中给出.根据目标区域的轮廓顶点坐标,通过等间距采样获得目标区域的点集合,然后利用所提的优化配置算法对工业相机的视场角进行优化配置.应用于圆柱体目标区域的工业相机视场角配置结果为 $11^\circ$ ,成像方向为 $(12.9^\circ, -6.5^\circ, 90.0^\circ)$ ;配置的不规则立体目标区域的视场角为 $14^\circ$ ,成像方向为 $(14.5^\circ, -9.5^\circ, -46.5^\circ)$ .优化配置后的效果分别展示在图6(b)和图6(d)中,可以看出成像区域和目标区域已经形成最佳匹配,若视场角再次减小,将使目标区域无法被完全成像,说明所提方法对不同形状的目标区域同样有效.

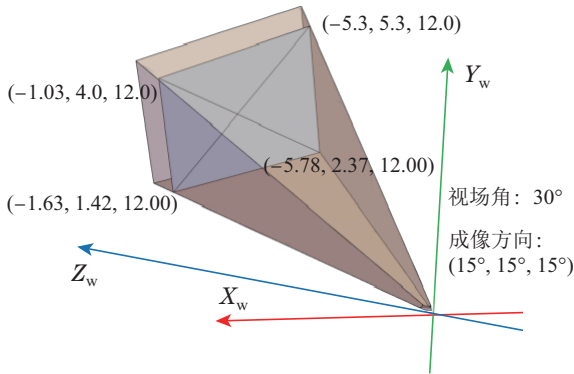
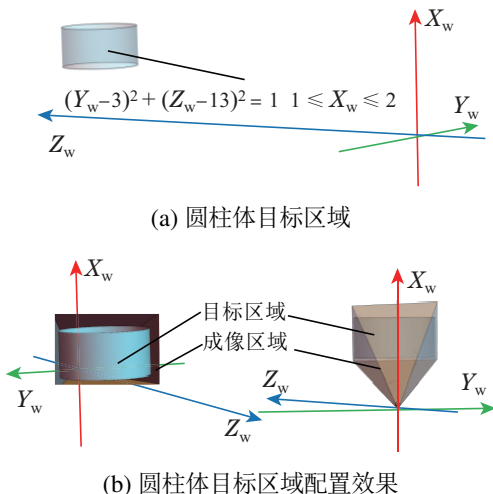


图5 预设的目标区域  
Fig. 5 Preset target region

表1 视场角优化配置算法的误差分布

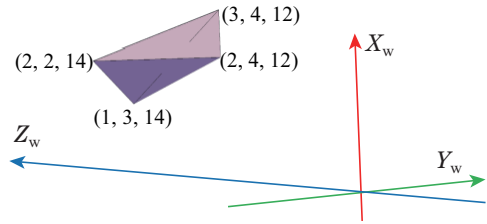
Table 1 Error distribution of field angle optimization algorithm

指标	本文优化配置方法		遗传算法优化配置			
绝对误差/ $l(^\circ)$	0	0.25	0.5	0	0.25	0.5
百分比/%	40	50.00	10.0	36	56.00	8.0

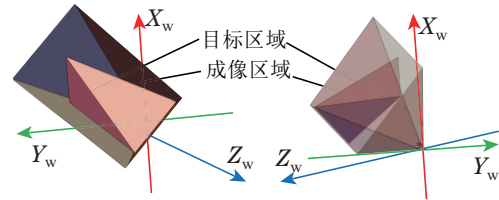


(a) 圆柱体目标区域

(b) 圆柱体目标区域配置效果



(c) 不规则立体目标区域



(d) 不规则立体目标区域配置效果

图6 应用于不同形状目标区域的工业相机视场角优化配置.  
Fig. 6 Optimal configuration of field angle for industrial cameras in different shape target regions

### 4.2 实物实验

为了验证本文方法的效果,搭建了如图7所示的试验系统:搭配变焦镜头的工业相机安装在成像方向调整架上,通过成像方向控制器精细化定量调节成像方向,然后将目标区域的光学图像转换成数字图像并传输至计算机进行显示、处理及存储.变焦工业相机通过改变镜头焦距调节视场角大小,其相关参数列于表2;为了方便比较成像的效果,设计了宽度由外至内逐渐减小的白色圆纹作为目标;目标区域设置为白纸的范围,则其4条边形成的轮廓即可表示整个目标区域.因此,目标区域的点集合可通过对四条边等间距采样获取,而每条边分别由其两端的顶点确定,顶点坐标经测量列在式(13),单位为dm.本文取采样间距为0.05 dm,则目标区域的点集合共有172个轮廓点的坐标.

$$C_T = \left\{ \begin{array}{l} (-1.8, 2.8, 14.5), (-1.8, 4.9, 12.4) \\ (0.3, 2.8, 14.5), (0.3, 4.9, 12.4) \end{array} \right\}. \quad (13)$$

未进行优化配置时工业相机的视场角为 $39.6^\circ$ ,成像方向为 $(20^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ ,其获取的目标图像展示在图8(a)中.由图可见,大量无效区域被成像,导致图像传感器的像素无法被有效利用,最高仅能分辨2 mm宽的目标圆纹.为了定量描述图像传感器的像素利用率,定义目标区域的像素数量与图像传感器总像素数量的百分比为有效像素比( $\eta$ ),计算方法如下:

$$\eta = \frac{n_t}{n_s} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 $n_t$ 和 $n_s$ 分别表示图像上目标区域的像素数量和图像总像素数量.

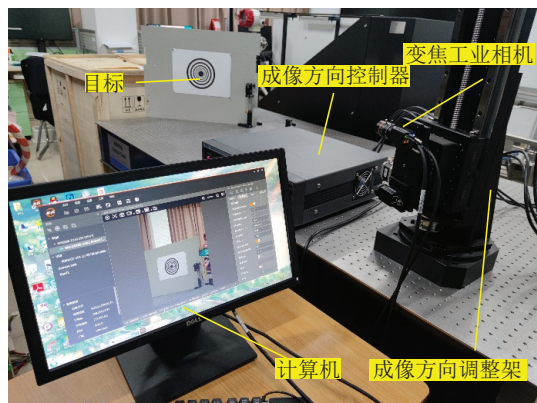


图 7 实验系统

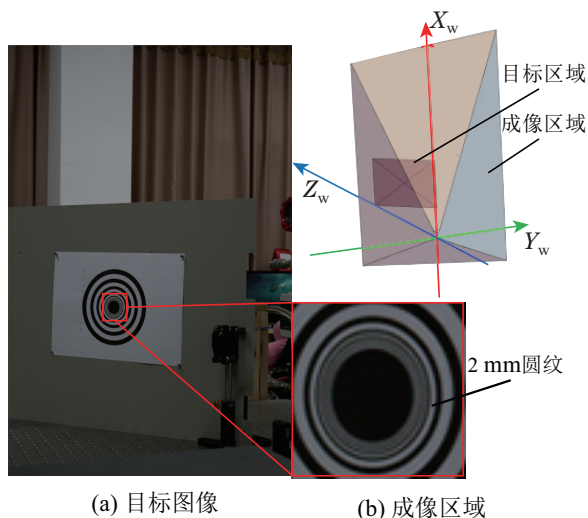
Fig. 7 Experimental system

表 2 变焦工业相机参数

Table 2 Zoom industrial camera parameters

参数	图像长宽比/k	视场角可调范围 $\omega/(\circ)$
值	1.5	3~40

经计算, 未进行优化配置时获取图像的有效像素比为11.4%. 利用建立的成像区域模型计算的成像区域如图8(b)所示, 目标区域在成像区域中的位置与实际图像对应, 只占整个成像区域的小部分.



(a) 目标图像

(b) 成像区域

图 8 未优化配置

Fig. 8 Before optimizing the configuration

将上述场景参数代入视场角优化配置算法中, 得到最大覆盖率随迭代次数增加(即视场角更新)的变化情况如表3所示. 迭代初期视场角大, 目标区域能够被完全成像, 因此后续迭代不断减小视场角, 直至第4次迭代, 更新的视场角已不满足完整覆盖目标区域的要求, 故第5次迭代更新的视场角增加.

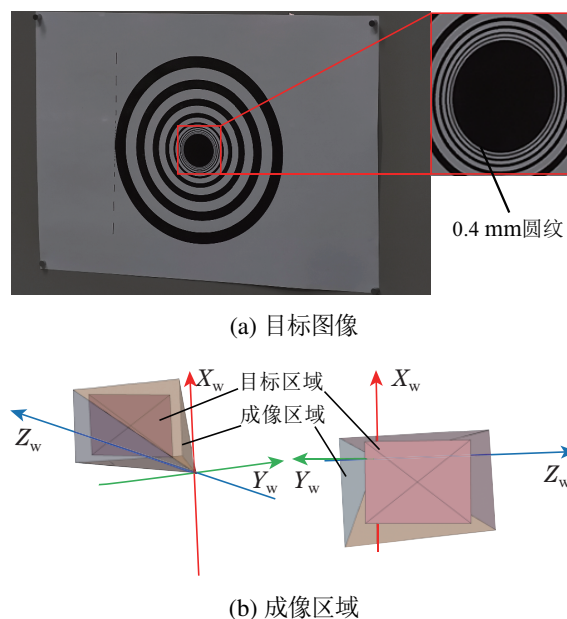
优化配置后的视场角为 $17^\circ$ , 成像方向为 $(16.2^\circ, 3.1^\circ, 86.8^\circ)$ . 工业相机获取的目标图像展示在图9(a)中, 经优化配置后, 目标区域几乎占满整个图像, 有效

像素比由优化前的11.4%增加到了75.09%, 像素的利用率大大提高, 对目标圆纹的分辨宽度提高到了0.4 mm. 需要特别说明的是, 图像传感器为规则矩形, 而目标区域的形状各不相同且可能不规则, 因此必定有部分像素对目标区域以外的场景成像, 有效像素比存在上限. 图9(b)从不同视角展示了相应的工业相机成像区域, 可以看到目标区域的上下轮廓已经非常接近成像区域的边界, 而目标区域的左右轮廓在成像区域之内且离成像区域的边界有一段距离, 这与实际图像相符. 若进一步减小视场角, 则有目标区域上下有部分空间无法成像, 说明本文的方法能够有效优化配置工业相机的视场角, 实现了以最小视场角获取完整目标区域.

表 3 最大覆盖率的变化情况

Table 3 Change in maximum coverage ratio

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8
视场角/ $^\circ$	128	64	32	16	24	20	18	17
最大覆盖率	1	1	1	0.93	1	1	1	1



(a) 目标图像

(b) 成像区域

图 9 优化配置后

Fig. 9 After optimizing the configuration

基于视觉传感的指针式仪表识别技术解决了人工抄表误差大、效率低和无法长期监控等问题, 已广泛应用于各种工业现场<sup>[24]</sup>. 然而, 由于传统视觉传感技术中的工业相机视场角度较大, 所采集的仪器图像质量有较大的提升空间. 为了进一步说明本文方法的应用价值, 构建了一个工业仪表识别的应用场景, 并将传统方法和本文提出的方法应用于该场景. 两者的应用结果如图10所示. 传统方法的视场角度为 $30^\circ$ , 有效像素比为2.2%. 应用本文方法后, 视场角度减小到 $11.5^\circ$ , 有效像素比提高到53.8%.

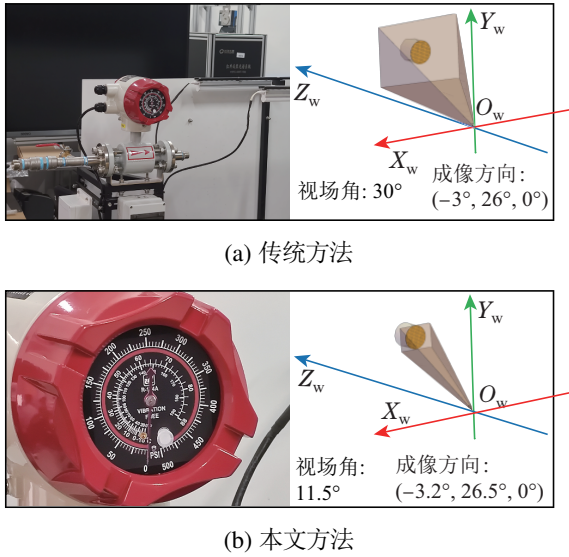


图 10 应用结果

Fig. 10 Application results

为了进一步说明应用性能,提取了两幅图像中仪表盘部分的区域,并与近距离拍摄的高分辨率仪表盘图像进行比较.对比结果如图11所示,传统方法获得的图像只能分辨出仪表盘最外圈的刻度,图像中的黄框部分表明内圈刻度的信息丢失严重.而在本文方法获得的图像中整个仪表盘清晰可见,与近距离拍摄图像的效果接近,为仪表识别提供了高质量的原始数据.

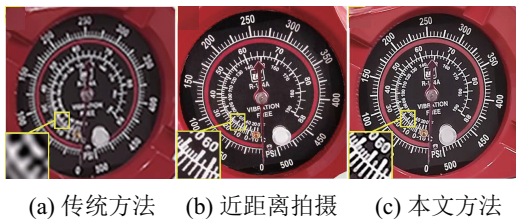


图 11 对比结果

Fig. 11 Comparison

为了更全面地体现所提方法的优点,使用平均梯度(average gradient, AG)、点锐度(point sharpness, PS)、标准差(standard deviation, SD)和图像熵(image entropy, IE)来评价每一种方法得到的图像质量.其中AG和PS是评价图像清晰度的指标,SD和IE是反映图像所含信息量的指标.评价结果如表4所示.由表4可以看出,本文方法的各项指标优于传统方法,与近距离拍摄的图像相差较小,说明本文方法能够有效提高获取的目标图像的质量.

## 5 结论

本文提出了一种基于成像区域模型的工业相机视场角优化配置方法,以便充分利用图像传感器的像素、提高成像质量.首先,提出了基于空间三维坐标系的成像场景量化描述方法,利用点坐标、旋转角度和点坐标集合量化描述工业相机的安装位置、成像

方向和目标区域;然后,基于空间坐标变换建立了工业相机的成像区域模型,揭示了工业相机的视场角、成像方向和成像区域之间的定量关系;进一步设计了基于二分-粒子群的视场角优化配置算法,实现了以最小的视场角获取完整的目标区域图像;最后,搭建了实验系统对本文方法进行了验证,结果表明该优化配置算法能够有效配置工业相机的视场角,使成像区域与目标区域达到最佳匹配,极大地提升了获取的目标图像的分辨率.本文方法可在视觉传感技术应用于工业领域时指导工业相机的选型和安装.

表 4 评价结果

Table 4 Evaluation results

指标	AG	PS	SD	IE
传统方法	5.32	7.92	50.99	6.97
近距离拍摄	10.27	43.04	69.66	7.21
本文方法	11.09	40.33	66.85	7.24

## 参考文献:

- [1] PENG Min, MA Ning, WANG Shaojun, et al. Gas leakage detection of industrial process based on visible image. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(6): 1-8. (彭敏, 马宁, 王少军, 等. 基于可见光图像的工业过程气体泄漏检测研究. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(6): 1-8.)
- [2] HUANG J, CHEN Z, JIANG Z, et al. 3D topography measurement and completion method of blast furnace burden surface using high-temperature industrial endoscope. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(12): 6478-6491.
- [3] MORU D K, BORRO D. Analysis of different parameters of influence in industrial cameras calibration processes. *Measurement*, 2021, 171: 108750.
- [4] LIU Wenguang, WANG Xiaodong, DONG Jihong, et al. Imaging parameter setting and calibration test of Tianwen-1 high-resolution camera. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(2): 178-184. (刘文光, 王晓东, 董吉洪, 等. 天问一号高分辨率相机成像参数设置及定标测试. *光学精密工程*, 2022, 30(2): 178-184.)
- [5] PAN D, JIANG Z, CHEN Z, et al. Compensation method for molten iron temperature measurement based on heterogeneous features of infrared thermal images. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(11): 7056-7066.
- [6] GU K, ZHANG Y, QIAO J. Vision-based monitoring of flare soot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 7136-7145.
- [7] ZHANG K, QU Z, LI J, et al. Design of a concentric multi-scale zoom optical system based on wide object distance and high-precision imaging. *Sensors*, 2022, 22(19): 7356.
- [8] YI Z, JIANG Z H, HUANG J, et al. Optimization method of the installation direction of industrial endoscopes for increasing the imaged burden surface area in blast furnaces. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(11): 7729-7740.
- [9] HUANG J, ZHAO J, GUI W, et al. Depth estimation from a single image of blast furnace burden surface based on edge defocus tracking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2022, 32(9): 6044-6057.



- [10] LIU Xiaofei, LI Mingjie. Night vehicle trajectory identification method based on infrared imaging. *Laser Journal*, 2022, 43(12): 51 – 55.  
(刘小飞, 李明杰. 基于红外成像的夜间车辆行驶轨迹识别方法. 激光杂志, 2022, 43(12): 51 – 55.)
- [11] YIN Jing, LIU Chunyan, LIU Xu, et al. Design of infrared zoom optical system for straw burning monitoring. *Laser & Infrared*, 2022, 52(1): 110 – 114.  
(尹晶, 刘春艳, 刘旭, 等. 秸秆焚烧火情监察红外变焦距光学系统设计. 激光与红外, 2022, 52(1): 110 – 114.)
- [12] YI Z H, CHEN Z P, JIANG Z H, et al. A novel 3-D high-temperature industrial endoscope with large field depth and wide field. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(9): 6530 – 6543.
- [13] ZHANG Wanhao, ZHANG Wenai, FENG Qingchun, et al. Tomato main-stem tracking control method based on PTZ camera. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(8): 216 – 225.  
(张万豪, 张文爱, 冯青春, 等. 基于云台相机的番茄主茎跟踪控制方法. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(8): 216 – 225.)
- [14] SHAO C, ZHANG L, PAN W. PTZ camera-based image processing for automatic crack size measurement in expressways. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 23352 – 23361.
- [15] HE L, JIANG Z, CHEN Z, et al. Velocity measurement of blast furnace molten iron based on local multi-feature correction using multi-stage filtered high-speed camera. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(19): 11537 – 11548.
- [16] HE L, JIANG Z, XIE Y, et al. Mass flow measurement of molten iron from blast furnace, based on trusted region stacking using single high-speed camera. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1 – 11.
- [17] LIU Zhimin, OUYANG Zhangdong, WANG Tian, et al. Full-view coverage estimation in heterogeneous visual sensor networks. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(1): 77 – 84.  
(刘志敏, 欧阳章东, 王田, 等. 异构视频传感器网络目标全视角覆盖估计模型. 电子学报, 2021, 49(1): 77 – 84.)
- [18] SURESH M S S, NARAYANAN A, MENON V. Maximizing camera coverage in multicamera surveillance networks. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 10170 – 10178.
- [19] AN Q, SHEN Y. Distributed coverage control for mobile camera sensor networks with anisotropic perception. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(14): 16264 – 16274.
- [20] XIAO F, YANG X, YANG M, et al. Surface coverage algorithm in directional sensor networks for three-dimensional complex terrains. *Tsinghua Science and Technology*, 2016, 21(4): 397 – 406.
- [21] FANG Sheng, LIANG Feibao, LIU Yongjin. A survey on statistical regression models and optimization algorithms. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(5): 638 – 654.  
(方升, 梁飞豹, 刘勇进. 统计回归模型及其优化算法综述. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 638 – 654.)
- [22] ZHANG Y, ZHOU P, CUI G. Multi-model based PSO method for burden distribution matrix optimization with expected burden distribution output behaviors. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(6): 1506 – 1512.
- [23] ZHANG H H, XUE Z S, LIU X Y, et al. Optimization of high-speed channel for signal integrity with deep genetic algorithm. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2022, 64(4): 1270 – 1274.
- [24] DONG Y, LIU X, YUAN Y, et al. Detail-attention convolutional neural network for meter recognition. *Scientia Sinica Technologica*, 2020, 50(11): 1437 – 1448.

#### 作者简介:

**易遵辉** 博士, 目前研究方向为光学成像、图像处理、工业过程参数检测, E-mail: zunhuiyi@hnust.edu.cn;

**蒋朝辉** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为图像处理与智能识别、智能传感与检测技术、人工智能与机器学习, E-mail: jzh0903@csu.edu.cn;

**陈晓方** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为流程工业智能优化制造、知识自动化、工业大数据分析, E-mail: xiaofangchen@csu.edu.cn;

**桂卫华** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂工业过程建模、优化与控制应用、故障诊断与分布式鲁棒控制, E-mail: gwh@csu.edu.cn.