

文章编号 1004-924X(2013)06-1621-07

# 图像式无砟轨道表面沉降在线监测系统

闵永智\*, 党建武, 张振海

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**将激光准直及图像检测技术应用于无砟轨道表面沉降监测之中,建立了图像式表面沉降在线监测系统。首先,介绍了图像式沉降监测方法的工作原理,给出了表面沉降在线监测系统的构成及工作方式。分析了沉降监测靶面激光光斑图像特征,并采用背景差分法来提高监测系统的环境适应度。然后,采用变结构元多尺度广义形态滤波法对光斑图像进行了预处理。最后,依据采集图像灰度呈高斯分布的特性,提出了基于重心的灰度分布曲线拟合法来精确定位光斑中心。实验结果表明:沉降实验室测试的合成不确定度最大为 0.198 mm;现场测试的 10 个月累积最大误差小于 1 mm。这些数据显示提出的系统可满足无砟轨道表面沉降在线监测对稳定性、精度和抗干扰能力的要求。

**关键词:**无砟轨道;表面沉降;图像检测;激光准直;在线监测

**中图分类号:**U238;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132106.1621

## Online surface settlement monitoring system of image-based ballastless track

MIN Yong-zhi\*, DANG Jian-wu, ZHANG Zhen-hai

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

\* Corresponding author, E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn

**Abstract:** On the basis of laser alignment and image detection technologies, an image based online surface settlement monitoring system was established to achieve the online surface settlement monitoring of ballastless track. Firstly, the operational principle of the image based settlement monitoring method was introduced and the components and working model of the online surface settlement monitoring system were described. Then, the image features of laser spot on the target surface for settlement monitoring were analyzed and the background difference method was used to improve the environmental adaptability of the monitoring system. Furthermore, the images of laser spot were preprocessed by the algorithm based on the multi-scale and generalized morphological filter with variant structuring elements. Finally, the center position of laser spot was accurately determined by a gray distribution curve fitting algorithm based on the center of gravity. The experimental results show that the combined uncertainty tested in a settlement laboratory is up to 0.198 mm and the maximum cumulate error under the field test for 10 months is less than 1 mm. The system has met the requirements of online surface settlement monitoring of ballastless track for high stabilization, reliability, precision, and ca-

收稿日期:2013-01-04;修订日期:2013-03-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60962004);铁道部科技计划资助项目(No. 2010G-014G)

capacity of resisting disturbance.

**Key words:** ballastless track; surface settlement; image detection; laser alignment; online monitoring

## 1 引言

无砟轨道是我国高速铁路的主要道床形式,是保证高速铁路安全运营的重要基础。在长期运营和气象灾害后无砟轨道易出现沉降,而高速铁路对无砟轨道沉降要求极其严格,即工后沉降在设计使用年限内不大于 15 mm。为保证高速铁路的运营安全,必须对无砟轨道沉降进行可靠的监测<sup>[1]</sup>。无砟轨道沉降监测按部位可分为表面沉降观测、深层(分层)沉降观测和断面沉降观测。沉降监测装置一般是将装置的底部位置作为无砟轨道沉降监测的基点<sup>[2]</sup>,即假设基点埋得很深,没有沉降,而实际上要做到这一点比较困难,特别是在已建成的高速铁路上实施更为困难。但不管哪一层发生沉降,通过传导将最终表现为无砟轨道的表面沉降<sup>[3]</sup>,为此在既有高速铁路上实施表面沉降监测是无砟轨道沉降监测的先行。经过多年的发展,无砟轨道沉降观测方法不断完善,但不同的观测方法适用于不同的工程地质条件。目前,无砟轨道沉降监测是在传统的一般路基沉降监测方法基础上继承、改进而来的,常规的监测方法有沉降观测桩、沉降板、磁环沉降仪、剖面沉降仪、单点沉降计及静力水准仪等。按检测原理来分,沉降观测桩和沉降板属于传统机械类观测装置,主要依靠人工观测完成,其余几类属于电磁观测装置,在机械装置的基础上依靠电感量变化来反映沉降量。但这些监测方法存在测量效率低、测量误差大、劳动强度大及不能自动在线监测等缺点。另外还有 GPS 测量和差分干涉雷达测量(Differential Inteferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR)等空间对地的沉降观测技术<sup>[4]</sup>,但也存在测量精度低、易受环境影响等缺点导致未能大规模应用。文献<sup>[5]</sup>提出了一种利用激光位移传感器测量路基下沉位移的方法,区别于传统方法,该方法有易于安装、能自动连续监测等优点,为无砟轨道沉降自动监测提供了新思路,但其稳定性及其监测精度还有待提高。

本文将激光准直技术及图像检测技术应用于无砟轨道表面沉降监测之中,通过分析无砟轨道

沉降监测单元的基本原理,建立了图像式无砟轨道表面沉降监测系统,并讨论了沉降监测系统中光斑中心定位的关键算法。实验及现场测试证明,基于激光的图像式沉降监测技术应用无砟轨道表面沉降监测领域,可在保证监测要求的同时,使系统具有适应能力强、可靠性高、不破坏原有无砟轨道结构、易于安装和实现在线自动测试等特点。

## 2 图像式无砟轨道表面沉降监测系统工作原理

### 2.1 图像式沉降监测原理

图像式沉降监测终端系统一般由点激光器(Dot Laser)、投影靶面(Projection target surface)、图像采集设备(Image acquisition devices)及图像处理(Image processing)设备及数据传输(Data communication)设备组成,如图 1 所示。其工作原理为:发射端固定在路基一个被测点(基准点),接收端固定在另一个被测点上,其图像采集设备安装在投影靶面正后方不远处,图像采集设备采集的图像幅面恰好覆盖投影靶面尺寸。发射端点激光发射器发出的准直激光束照射到远处的投影靶面上形成一个近似圆形光斑,由于发射端和接收端都和路基近似认为是刚性连接,当被测点路基发生沉降时,接收端投影靶面上的激光光斑也会产生相同的位移,通过图像采集设备采集激光光斑变化前后的 2 幅图像,然后由光斑中心定位算法定位它们的中心位置( $x, y$ )和( $x', y'$ ),最后对前后两幅图像的光斑中心做差分,即

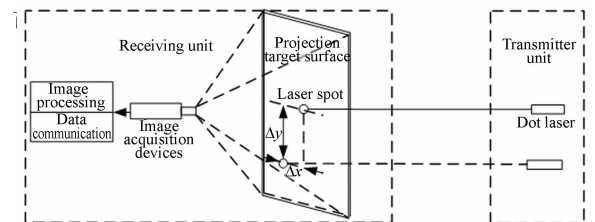


图 1 图像式沉降监测终端原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of image settlement monitoring terminal

得出路基的垂直沉降量  $\Delta y = y - y'$  和横向位移量  $\Delta x = x - x'$ 。

## 2.2 图像式无砟轨道表面沉降监测系统工作原理

图像式无砟轨道(Ballastless track)表面沉降监测系统的总体布局如图2所示,图像式沉降监测终端(Image Settlement Monitoring Terminal)沿着钢轨方向,依据沉降监测要求,相互间隔25~50 m的距离安装在无砟轨道上。

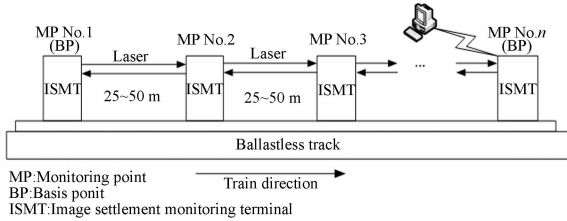


图2 图像式无砟轨道表面沉降监测系统

Fig.2 Surface settlement monitoring system of image-based ballastless track

每个沉降监测终端的摄像机镜头对准自身前方(或后放)沉降监测终端的激光光源,定时得到该监测点(Monitoring Point)的相对沉降量( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ )。若以某监测点为基准点(Basis Point),则可通过对所有沉降监测点相对沉降数据进行融合与分析,完成监测区间内部的绝对沉降量值传递,最终得到某一监测点在整个监测区间内的绝对位移,并通过一个沉降监测点将所有数据引回到监控中心,完成相对于基准观测点的绝对沉降数值测量。

## 3 图像式沉降监测光斑中心精确定位算法

### 3.1 背景差分图像预处理

事实上沉降监测系统发出的激光经过较远距离的传输到达靶面的过程中,会受到大气湍流、衍射、散射的影响,在监测靶面上所形成的图像将不再是一个光点,而且存在一些衍射条纹和散射弱光,且光斑往往不规则<sup>[6]</sup>。其次监测现场的阳光、列车车灯等自然光线经常会照射到投影靶上,形成对激光光斑信号的干扰。另外,激光光线在传输过程中可能会遇到尘埃、水汽、飞虫等小物体的

干扰,会导致光斑随机出现耀点或暗点。在对这种干扰后的光斑图像进行中心的精确定位,传统的中心定位算法已不能满足要求<sup>[7]</sup>。

为此,本文图像处理前利用背景差分法<sup>[8]</sup>进行图像预处理,背景差分法是指在控制发射端激光器的亮灭,在其亮时测得一幅包含背景的图像,激光器灭时测得到若干幅只包含背景的图像,然后进行图像比较,减去背景光干扰,得到一幅仅带激光光斑的纯激光图,从而提高测量装置对环境的适应能力。

### 3.2 变结构元多尺度广义形态滤波法

无砟轨道路基沉降监测系统采集到的光斑图像都会有噪声干扰,因此在对激光光斑图像中心精确定位前,需要对图像进行滤除噪声处理。数学形态滤波是基于待处理图像的几何结构特征<sup>[9]</sup>,利用预先定义的结构元素对待处理图像进行匹配或局部修正,以达到提取信号、抑制噪声的目的。但只采用单一的结构元在滤除噪声的同时会损失一些图像的细节特征,使其不能平滑输出,为此采用变结构元的多尺度滤波<sup>[10]</sup>的累计平均值作为输出。

为了有效消除采集图像中比结构元小的噪声,同时又避免大的结构元平滑图像边缘细节信息,本文取0、45、90、-45°4个方向3×3邻域内的三点线性变结构元<sup>[11]</sup>进行多尺度广义形态滤波。该滤波算法具有空间不变性,不仅有效地抑制了数字图像中的噪声,而且很好地保持了数字图像的边缘细节信息,为后续处理提供了高质量的数字图像。

### 3.3 基于重心的灰度分布曲线拟合法

在通常的情况下,对图像中圆、椭圆和矩形等中心对称的目标进行定位最常用的是重心法<sup>[12]</sup>。重心法虽然简单明了,但该算法只有对图像灰度对称分布的目标才能获得理想效果。如果图像重心会发生偏移如靶面与镜头光轴有较大的夹角时,利用重心定位法会产生较大的误差<sup>[13]</sup>,而曲线拟合算法又必须逐点参与运算,效率太低。为此结合重心法和曲线拟合算法的优点,即先由重心法找到光斑图像的重心初始位置,再以该位置像素点为中心点对水平方向和垂直方向进行曲线拟合。

根据方形孔采样定理,图像采集设备采集到的激光光斑灰度近似符合高斯分布<sup>[14]</sup>,其分布曲

线的对数形式表达式如式(1)所示:

$$\ln y = \ln \frac{1}{\sqrt{2ps}} - \frac{(x-m)^2}{2s^2}. \quad (1)$$

依据式(1)可以对灰度高斯分布进行二次曲线拟合。

下面以沉降监测垂直方向沉降为例,设二次曲线的形式如下:

$$f(y) = Ay^2 + By + C. \quad (2)$$

目标图像的每个像素的输出灰度值为:

$$f_{ny} = \int_{n-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (Ay^2 + By + C) dy. \quad (3)$$

若前面通过重心法求出的光斑中心坐标为  $(x_0, y_0)$ , 且该像素的灰度值为  $f_{0y}$ , 令该点的序号为 0, 则据式(3)可以得出:

$$f_{0y} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (Ay^2 + By + C) dy = \frac{1}{12}A + C. \quad (4)$$

然后以该点为中心点, 向前向后各取一个像素点, 记为  $f_{-1y}$  和  $f_{1y}$ , 据式(4)可以得出:

$$\begin{cases} f_{1y} = \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} (Ay^2 + By + C) dy = \frac{26}{24}A + B + C \\ f_{-1y} = \int_{-\frac{3}{2}}^{-\frac{1}{2}} (Ay^2 + By + C) dy = \frac{26}{24}A - B + C \end{cases}. \quad (5)$$

依据式(4)~(5), 可以求出二次曲线的顶点为:

$$y = \frac{f_{1y} - f_{-1y}}{2(2f_{0y} - f_{-1y} - f_{1y})}. \quad (6)$$

式(6)对原高斯曲线取对数式(1)并记中心坐标为 0 的结果, 因此, 上式中的灰度值用对数值代替, 这样就得到垂直方向的亚像素中心为:

$$y_{\text{sub}} = y_0 + \frac{\ln f_{1y} - \ln f_{-1y}}{2(2\ln f_{0y} - \ln f_{-1y} - \ln f_{1y})}. \quad (7)$$

同理按照式(7)可以求出水平方向的亚像素中心为:

$$x_{\text{sub}} = x_0 + \frac{\ln f_{1x} - \ln f_{-1x}}{2(2\ln f_{0x} - \ln f_{-1x} - \ln f_{1x})}. \quad (8)$$

这样, 由式(7-8)就可以求得靶面激光光斑的中心坐标  $(x_{\text{sub}}, y_{\text{sub}})$ 。

## 4 测试实验与结果

### 4.1 实验室测试及结果

无砟轨道路基沉降监测装置采用加拿大

Nanoline Laser 公司生产的 SNF-501 型半导体激光器作为激光光源, 波长为 658 nm, 最大输出功率为 50 mW。激光发射器固定在一个 SLGB60 三维高精密度位移平台上, 通过微调螺栓可以在量程内自由升降, 精度为 0.01 mm, 它安装在投影靶正前方。投影靶面尺寸 150 mm × 150 mm, 光学成像系统安装在投影靶面正后方 0.2 m 处, 镜头焦距为 16 mm。相机采用 Macrovision 公司的 MV3000UC CMOS 相机, 像元数为 2 048 × 1 536, 像元尺寸为 3.2 μm × 3.2 μm。

在实验时, 激光器固定在靶面前 50 m 处。通过三维精密位移平台调整激光器上下位置, 用摄像机采集每个位置的图像数据, 计算出激光光斑的中心位置(pixel), 在实验室摄像机标定的基础上转换成激光光斑中心变化的位移变化值(mm), 实验室标定板图形中心距离误差为 ±0.01 mm。实验结果如表 1 所示。

表 1 沉降测量结果

Tab. 1 Settlement measurement results

激光器升降值 /mm	测量平均值/mm	测量次数	A 类不确定度 /mm	B 类不确定度 /mm	合成不确定度 /mm
-7.000	-7.173	10	0.184	0.006	0.184
-5.000	-5.123	10	0.153	0.006	0.153
-4.000	-3.831	10	0.179	0.006	0.179
-2.000	-2.184	10	0.191	0.006	0.191
-1.000	-1.132	10	0.149	0.006	0.149
1.000	1.152	10	0.156	0.006	0.156
2.000	1.895	10	0.131	0.006	0.131
3.000	2.836	10	0.168	0.006	0.168
6.000	5.861	10	0.152	0.006	0.152
7.000	7.191	10	0.198	0.006	0.198

由表 1 可见, 本沉降测试系统实验室测试最大合成不确定度为 0.198 mm, 满足了无砟轨道沉降监测要求。单次检测时间为 0.713 s。由于无砟轨道沉降是一个缓变化量重点关注的是监测精度, 故对采样时间要求不高。

### 4.2 现场测试及数据分析

图 3 是图像式无砟轨道沉降监测系统在现场应用的照片。在某线路 K175+500, K175+550, K175+600 处分别安装 1#、2#、3# 图像式无砟轨道沉降监测装置, 将 K175+460 处设置为观测

基准点,经过 10 个月的监测,系统运行稳定。依照《客运专线无砟轨道铁路工程测量暂行规定》对照德国蔡司 DINI12 电子水准仪观测(observation),由于幅面关系,仅给出有代表意义的 1#、3# 监测点监测(monitored)结果,如图 4 所示。



图 3 图像式无砟轨道沉降监测系统现场

Fig. 3 Settlement monitoring system for image-based ballastless track in field

由图 4 可以看出 1#、3# 监测点的沉降经历了隆起-稳定-沉降过程,实际在冬季冻土上冻时间到来时,该监测点发生了冻胀;在春季冻土消融期,该监测点又慢慢恢复到原来水平,在夏季暴雨过后发生了较大的沉降,累积可达 3.5 mm。从监测结果上来看,符合运营无砟轨道沉降规律。10 个月来该监测算法与人工观测累积最大误差小于 1 mm,满足测试精度要求。

## 参考文献:

- [1] 肖宏,蒋关鲁,魏永幸,等. 客运专线无砟轨道桩网结构模型试验研究[J]. 铁道学报,2007,29(2):126-131.  
XIAO H,JIANG G L,WEI Y X, et al.. Model test of column-net structure for dedicated passenger line unballasted track [J]. *Journal of The China Railway Society*, 2007, 29(2):126-131. (in Chinese)
- [2] 李明领. 客运专线无砟轨道铁路线下结构沉降变形观测与评估技术[J]. 中国工程科学,2009,11(1):48-59.  
LI M L. Deformation monitoring and assessment

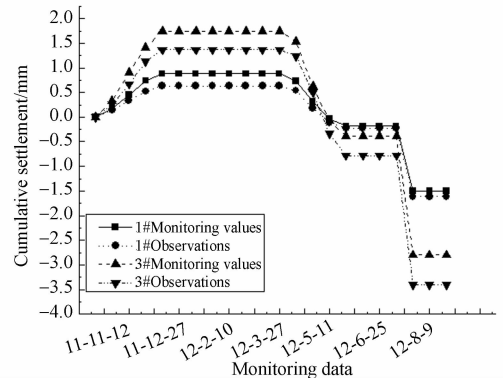


图 4 现场测试结果

Fig. 4 Test results in field

## 5 结 论

本文依据无砟轨道沉降监测技术精度要求高的特点,建立了图像式表面沉降在线监测系统,并介绍了该监测系统测量原理。针对传统光斑定位技术在接收靶面受到干扰的不规则光斑图像定位时会产生较大误差的问题,研究了利用背景差分方法及变结构元多尺度广义形态滤波的图像预处理方法。最后依据采集图像灰度呈高斯分布的特性,研究了一种先利用重心法进行光斑中心初步定位,然后再用二次曲线拟合灰度分布对光斑中心进行精确定位的基于重心的灰度分布曲线拟合方法。实验结果表明:实验室测试沉降测量合成不确定最大为 0.198 mm;现场测试 10 个月累积最大误差小于 1 mm。该系统满足无砟轨道表面沉降的在线监测的稳定可靠、精度高、抗干扰能力强等要求。

- technology for substructure of unballasted track on railway passenger dedicated line [J]. *Engineering Science*, 2009, 11(1): 48-59. (in Chinese)
- [3] 魏永幸. 客运专线无砟轨道铁路工后沉降评估技术[J]. 铁道工程学报,2008(z1):94-109.  
WEI Y X. Evaluating technology on post-construction settlement of ballastless track on passenger dedicated line [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2008(z1):94-109. (in Chinese)
- [4] 王登浩. 武广铁路客运专线沉降观测与预测技术[J]. 铁道科学与工程学报,2008,5(3):60-64.  
WANG D H. Technologies for Wuhan-Guangzhou

- railway passenger dedicated line settlement observation and prediction of settlement deformation [J]. *Journal of Railway Science And Engineering*, 2008, 5(3): 60-64. (in Chinese)
- [5] 徐实. 基于激光准直特性的隧道整体道床沉降图像监测技术[J]. *中国铁路*, 2012(5):84-86.  
XU Sh. Tunnel monolithic roadbed settlement image monitoring technology based on laser collimation [J]. *China Railway*, 2012(5):84-86. (in Chinese)
- [6] 唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. *北京机械工业学院学报(综合版)*, 2009, 24(1): 61-64.  
TANG G Q. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1):61-64. (in Chinese)
- [7] 樊巧云, 张广军. 离散噪声图像的光斑质心算法及其硬件实现[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2992-2998.  
FAN Q Y, ZHANG G J. Spot centroiding algorithm for discrete noise image and its hardware implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2992-2998. (in Chinese)
- [8] 贾文, 唐慧君, 闫旻奇, 等. 一种低对比度激光光斑中心定位新方法[J]. *激光与红外*, 2008, 38(10): 1056-1058.  
JIA W, TANG H J, YAN M Q, *et al.*. A new method for calculation of the low contrast laser spot center [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(10):1056-1058. (in Chinese)
- [9] 母一宁, 刘泉, 于林韬, 等. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2197-2204.  
MU Y N, L Q, YU L T, *et al.*. Application of hartmann technique in sequence spot detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2197-2204. (in Chinese)
- [10] 钮赛赛, 沈建新, 梁春, 等. 人眼像差探测哈特曼波前传感器的质心优化[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12):3016-3024.  
NIU S S, SHEN J X, LIANG Ch, *et al.*. Centroid optimization of hartmann-shack wave-front sensor for human eye aberration detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 3016-3024. (in Chinese)
- [11] 王志乾, 刘兆蓉, 赵雁, 等. 变形测量系统中激光光斑中心精确定位算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(6):485-489.  
WANG ZH Q, LIU Z R, ZHAO Y, *et al.*. Precise center location algorithm for laser spot in distortion measuring system [J]. *Journal of electronic measurement and instrument*, 2011, 25(6): 485-489. (in Chinese)
- [12] 朱晓亮, 彭复员, 杨述斌, 等. 基于多尺度形态学的弱目标图像处理方法[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(6):482-484.  
ZHU X L, PENG F Y, YANG X B, *et al.*. Image processing method of dim target based on multi-scale morphology [J]. *Infrared And Laser Engineering*. 2002, 31(6):482-484. (in Chinese)
- [13] 赵昊, 于晓洋, 张修宝. 点结构光精密位移传感器的仿真研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2007, 12(2):97-99.  
ZHAO H, YU X Y, ZHANG X B. A simulation study of precise displacement sensor based on dot structured light[J]. *Journal of Harbin University of Science And Technology*. 2007, 12(2): 97-99. (in Chinese)
- [14] 刘兆蓉, 王志乾, 刘绍锦, 等. 激光光斑中心精确定位算法研究[J]. *计算机仿真*, 2011, 28(5): 399-401, 409.  
LIU ZH R, WANG ZH Q, LIU SH J, *et al.*. Research of preciselaser spot center location algorithm [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(5): 399-401, 409. (in Chinese)

## 作者简介:



闵永智(1975—),男,陕西城固人,博士研究生,副教授,1996年在陕西工学院获学士学位,2004年于武汉大学获得硕士学位,主要从事智能测试及机器视觉方面的研究。E-mail: minyongzhi@mail.lzjtu.cn



张振海(1983—),男,河南林州人,博士研究生,讲师,分别于2003年、2006年在兰州交通大学获得学士、硕士学位,主要主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: zhang\_zhen\_hai@126.com

## 导师简介:



党建武(1963—),男,陕西富平人,博士,教授,博士生导师,1986年于兰州铁道学院获学士学位,1992年于西南交通大学获硕士学位,1996年于西南交通大学获博士学位,主要从事软件工程、神经网络、交通信息工程及控制和计算机应用。E-mail: dangjw@mail.lzjtu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)