

一种小口径井下救援机器人系统设计

江浩¹, 王传江¹, 张志献¹, 吴建²

(1. 山东科技大学 机器人研究中心, 山东 青岛 266590; 2. 莱芜钢铁集团有限公司 特殊钢厂, 山东 莱芜 271104)

摘要:小口径深井救援机器人的研制目的在于改变落井事故的救援方式。系统采用模块化的设计结构,分为井上救援操作平台和井下救援机器人本体两部分:井下部分的机器人本体由抱持手臂、探接手臂、本体机架、机器人定位支撑四个模块组成;井上部分为机器人的操作与控制模块。本体中的抱持手臂、探接手臂等救援动作执行机构,在设计中将其所要承担的救援载荷与机构动作时所克服的工作阻力在空间正交,从而实现救援载荷由模块结构承担,无需模块上的机构动作驱动电机提供动力,机构动作则采用小功率直流电机驱动,因此系统可以由低于36 V的直流电源供电;机器人的操作与控制通过Wi-Fi定向无线传输系统实现。试验表明,系统能够实现有效救援。
关键词:救援机器人;深井救援;不完全齿轮;抱持手臂;Wi-Fi定向传输

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)04-0088-06

Design of a Small Caliber Well Rescue Robot System

Jiang Hao¹, Wang Chuanjiang¹, Zhang Zhixian¹, Wu Jian²

(1. Robotics Research Center, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Special Steel Works, Laiwu Iron and Steel Group Co. Ltd, Laiwu, Shandong 271104, China)

Abstract: The design of small caliber well rescue robot has changed the traditional rescue method in the accidents of children falling in wells. The whole system adopts modular design consisting of a rescue operation platform on the ground and a set of rescue mechanism in the well. The underwell rescue mechanism is composed of the clasp arm, the stretching arm, the framework and the robot anchorage mechanism, and the rescue operation platform including a manipulator and control module. The rescue load and the working resistance of the clasp arm and the stretching arm has space orthogonal characteristics, which ensures the modular mechanism and prevents the driven motor being burdened with rescue load. As a result, the whole mechanism can be driven by miniwatt DC motors for DC power below 36V. Meanwhile, the robot is manipulated and controlled through Wi-Fi directional transmission system. The experiment proves that this system can implement effective rescue.

Key words: rescue robot; deep well rescue; incomplete gear; clasp arm; Wi-Fi directional transmission

近年来,儿童不幸落井的事故时有发生,特别是发生于30~50 cm口径的各种机井、探井、水井以及建筑施工桩井的落井事故,救援难度大,救援方法单一,没有专门的救援设备。由于井下空间狭小,救援人员很难下到井下,即使下到井下也无法实施救援作业,同时井下狭小的空间所造成的缺氧,不仅使落井者危险,还常常严重危及救援人员的安全。目前,面对这样的事故救援现场,多采用大规模开挖事故现场^[1-2],把事故井及其周围土方全部打开再救人^[3-4]。这种救援方法不仅费力,而且时间的延误常会导致救援失败。基于上述情况,针对性地研发一种小口径深井救援机器人,替代人力进行抢险和救援。小口径深井救援机器人能够深入到事故井下,探测井下实况,与地面救援人员和机器人操作人员进行包括视频音频在内的实时通信联络,确定救援机器人的具体救援动作,最后完成对落井人员的施救^[5-6]。

收稿日期: 2014-02-23

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2009GQ012); 国家安全生产监督管理总局科技计划项目(10-067)

作者简介: 江浩(1959—),男,湖北武汉人,高级工程师,主要从事特种机器人技术研究。E-mail: 13789879182@163.com

本研究对小口径深井救援机器人的机构组成原理、机器人自由度、构件运动形式和传动方式进行设计优化,确定其在小口径深井井筒中作业和事故救援中应具备的功能。

1 小口径井下救援机器人总体设计原则

- 1) 结构满足功能需要,整机重量轻、结构紧凑、携带方便、小口径深井井筒井壁适应性强;
- 2) 组成部件模块化,功能明确,换装方便,可适应不同救援现场;
- 3) 尽可能减少各功能部件在狭小井筒中占据的救援空间,救援手臂能够顺利找寻被救人员与井筒侧壁间可能的间隙,并利用这些间隙实施救援作业;
- 4) 救援时构件通过各种动作达到可以将被救援者移出深井的姿态,救援所需的 30 kg 载荷承载能力由各部件的结构设计受力状态决定,与驱动构件的动力大小无关,机器人各部件的运动均采用小功率直流电机驱动;
- 5) 机器人井下部分重量及救援载荷由位于井上的提升机构承担,该提升机构和同样位于井上的控制部分组成上位机,提升机满足救援作业深度 5~30 m 的要求,系统能源由车载直流电源提供;
- 6) 采用视频图像实时监控,满足救援时准确、快速、避免对人员二次伤害的要求。

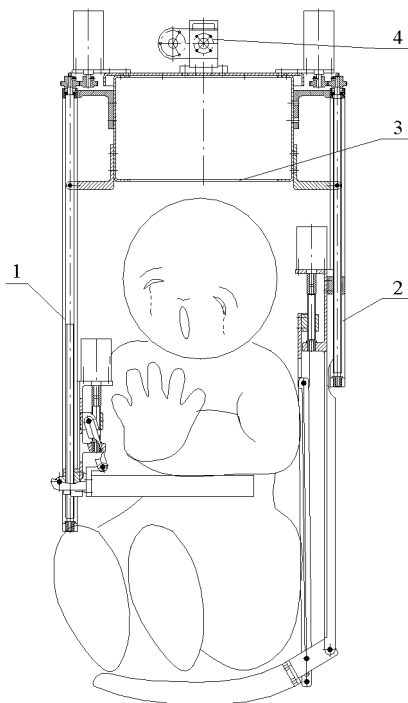
2 井下救援机器人的机构组成

小口径深井救援机器人由井下救援机械系统和井上操作控制系统两部分组成,其中实施井下救援操作的机械系统有 4 个部件,如图 1 所示。

2.1 抱持手臂机构

抱持手臂是救援机器人的保护机构,其功能主要是避免救援过程中对被救人员形成二次伤害。文献[5-7]提出一种由外导管和内滑管构成的抱持手臂机构,存在工艺实现难度大和稳固特性不理想的问题。为此采用一种易于加工、稳定性好且精度高的不完全齿轮结构的新型抱持手臂机构^[8],其原理是采用一对大齿数差的齿轮副,小齿轮主动,由电机驱动,大齿轮为不完全齿轮,其有齿部分与小齿轮啮合实现运动的传递,无齿部分则作为抱持手臂机构的手指,大齿轮的动作不是绕定轴转动,而是利用其齿圈圆弧在相应的圆弧轨道中移动,圆弧轨道亦是抱持手臂机构手指的支撑,手指在轨道中沿圆弧方向伸缩往复移动,实现手指的开合。结构如图 2 所示,主要由垂直下探移动导轨、垂直下探驱动伺服电机及其驱动螺旋传动机构、抱持手臂弧形导轨、抱持手臂不完全齿轮驱动弧形手指、抱持手臂不完全齿轮驱动机构、抱持手臂上下微调机构、抱持手臂俯仰角度微调机构以及抱持手臂整体机构与本体机架的连接结构组成。

救援作业时,不完全齿轮驱动弧形手指呈完全缩回到弧形导轨内部的状态,当抱持手臂在垂直下探机构的驱动下到达救援位置后,上下微调机构通过伺服电机驱动螺旋副的转动对弧形手指实施救援的位置精确定位,俯仰角度微调机构通过伺服电机驱动曲柄滑块机构对弧形手指实施救援的角度精确定位,同时与探接手臂机构,尤其是探接手臂机构中的接探翻转托架协同配合,在救援人员通过视频和控制系统实时监控和操作下,弧形手指从弧形导轨中伸出,将被救人员牢牢抱住,从而实现对被救人员的可靠固定。该机构工作时的受力方向与被救人员主要受到的重力方向垂直,驱动电机要



1. 抱持手臂; 2. 探接手臂; 3. 本体机架; 4. 机器人定位支撑

图 1 机器人井下救援系统结构

Fig. 1 The structure of the under-well rescue system of the robot

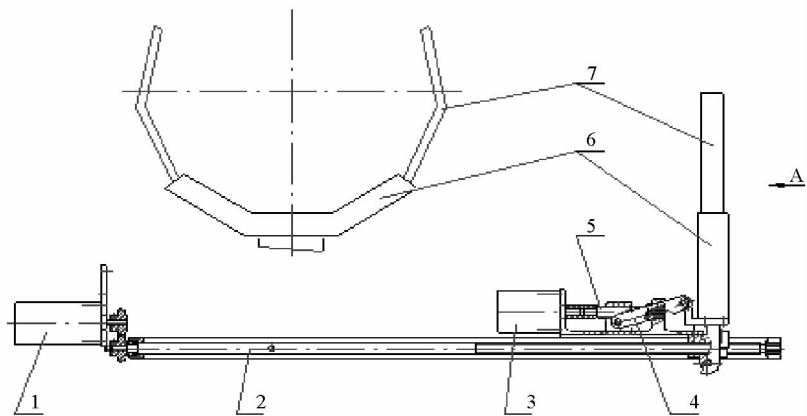
完成驱动抱持手臂沿圆弧轨道的伸缩移动,只需克服机构摩擦力,所以选择小功率电机即可满足需求,机构承载能力由结构几何要素及构件材质决定。

2.2 探接手臂机构

探接手臂是救援机器人的主要救援承载机构,功能是在救援过程中承载被救人员的重量。其原理是移动副与曲柄滑块机构的复合运动实现探接手臂的伸缩与反转。如图 3 所示,主要由垂直下探移动导轨、垂直下探驱动伺服电机及其驱动螺旋传动机构、探接手臂的探接翻转托架、托架转动拉杆、托架转动驱动电机及其驱动螺旋传动机构和探接手臂机构与本体机架的连接结构组成。救援作业时,探接手臂随同整机从井口向下移至被救人员上方,救援人员在井口通过视频和控制系统操纵机器人整体移动和旋转,将探接手臂从落井人员与井壁之间的侧壁空隙中伸到落井人员下方,启动托架转动电机,驱动托架螺旋传动机构及托架转动拉杆,使托架由垂直方向转动到水平方向,托住被救人员。其中,托架螺旋传动机构、托架转动拉杆、托架这三部分的关联运动由一套曲柄滑块机构的运动实现。文献[6]的仿真结果说明了该机构设计的可靠性。该机构的驱动电机只要求能够完成全部机构的运动传递,电机功率大小仅需满足机构本身运动时克服摩擦力的要求,探臂所要求的救援承载能力由机构具有自锁性能的螺旋副、零件材质及构件几何形状决定。被救人员的绝大部分重量由探接手臂承载,在设计时运用 ANSYS 有限元仿真分析软件对关键零件进行静力分析,并在实验室样机制作中取得较为理想的结果。

2.3 定位支撑机构

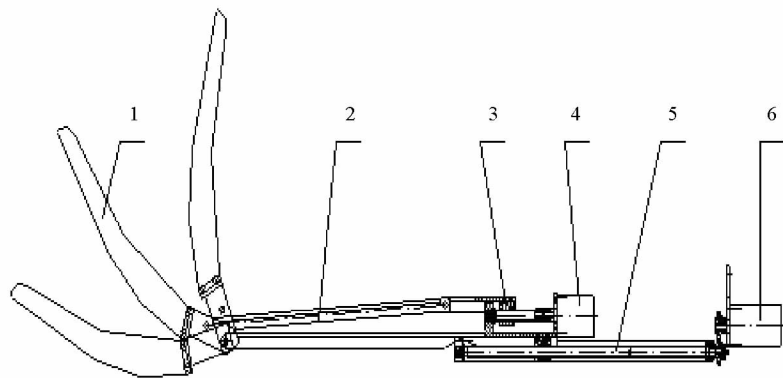
救援机器人作业时必须与井筒筒壁之间可靠固定,以保证机器人的探臂、抱臂等功能部件对被救者做出所需的救援动作,定位支撑机构就是实现救援机器人与井筒筒壁之间可靠固定的部件,其原理是同步转动且旋向相反的双向同速转动驱动机构,驱动位于同一直径上两个移动方向相反的移动支撑锚杆外伸,支撑在井筒筒壁上,锚杆端部的锚杆头与井筒筒壁之间可产生较大的摩擦力,使得救援作业时机器人整机不转动不摆动,机器人相对于被救者位置固定,保证其他部件可靠工作。



1. 垂直下探驱动电机; 2. 移动导轨; 3. 抱持手臂上下微调驱动电机; 4. 抱持手臂俯仰微调机构;
5. 抱持手臂上下微调机构; 6. 抱持手臂弧形导轨; 7. 不完全齿轮驱动的弧形手指

图 2 抱持手臂机构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the clasp arm



1. 探接翻转托架; 2. 托架转动拉杆; 3. 驱动螺旋传动机构; 4. 托架转动驱动伺服电机;
5. 垂直下探移动导轨; 6. 垂直下探驱动伺服电机

图 3 探接手臂机构原理图

Fig. 3 The schematic diagram of the stretching arm

如图 4 所示,安装在机架的平面上,由导向底座、移动支撑锚杆、双向同速转动驱动机构、驱动电机、驱动

传动齿轮副、正反螺旋联轴器以及锚杆头等组成。救援作业时,伺服电机带动传动齿轮副转动以驱动双向同速转动驱动机构,实现移动支撑锚杆的同时直线外伸移动,当两侧锚杆头同时顶住井壁后,使得整个救援机器人的井下部分完全固定,既包括高度位置的确定,又包括角度位置的确定。移动支撑锚杆的同时外伸,由双向同速转动驱动机构中的等导程、等直径、等螺旋角、旋向相反的螺旋副的等速转动实现。当救援机器人井下整体救援系统上下移动时,移动支撑锚杆可同时直线内缩移动,使锚杆头与井壁之间保持一定的安全距离,保证机器人能够在井筒中上下移动。支撑锚杆的往复直线移动方向与机器人整体在井筒中的上下移动方向始终保持正交状态,运动各自独立,且分别控制。该机构的驱动电机只要求能够完成锚杆伸缩移动的运动传递,其功率大小仅需满足机构本身运动时克服摩擦力的要求,整个机构的定位支撑受力则由机构具有自锁性能的螺旋副承载。

2.4 本体机架

救援机器人本体机架如图 5 所示,是救援机器人整体结构的支撑部件,承担安装连接探接手臂、抱持手臂、定位支撑三个机器人的功能部件,同时,机架用钢丝绳与井上的提升机相连,通过提升机的运转实现机器人救援结构本体在井筒中的升降移动。另外,为保证机器人在井中上下移动时能够适应各种粗糙内壁和不规则形状,机架上还对称设置安装了四对导向滑轮,导向轮设计了弹簧自动封闭结构,使其在井中移动时始终保持与井壁的附着粘合,从而使机器人移动时能够平衡、稳定。

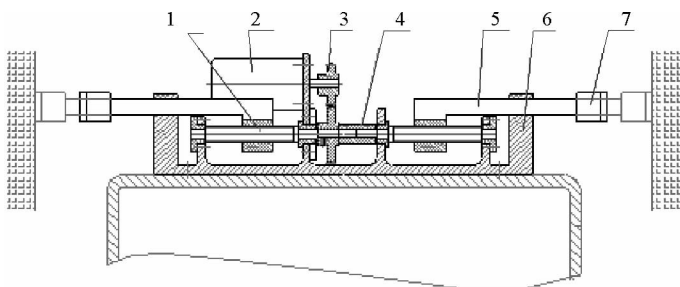
3 救援机器人的井上操作及监控系统

机器人井上操作及监控系统包括机器人升降操作系统和机器人监控平台两部分。救援机器人井下部分(图 1)是救援作业的主体,它在井筒内的上升和下降、实施救援时被困人员位置的确定以及救援时的全部载荷,都决定于井口地面的升降系统。该升降系统由与机器人井下救援系统相连的卷扬机及绳索等组成,卷扬机由电机驱动,同时还备有手动升降机构,可实现机器人救援系统安全可靠地进入到井下施救。监控系统是基于计算机的视频监控显示及操作控制单元,可实现井下视频的显示以及井上井下双向语音传输,能够通过点击控制界面的按钮实现对井下救援系统的操作控制。

3.1 音频、视频采集传输系统

在进行井下救援工作时,一方面要与落井人员进行交流,尤其是落井的孩子,通过与父母之间的语言沟通,能够在很大程度上缓解紧张情绪,增强信心。另一方面,救援人员要充分了解落井人员的位姿情况,以便确定安全可靠的救援措施。因此,救援机器人设计了井下音频、视频采集传输系统。依靠安装在机器人下方的照明装置,实现视频信息的采集。井下音视频采集系统框图如图 6 所示。

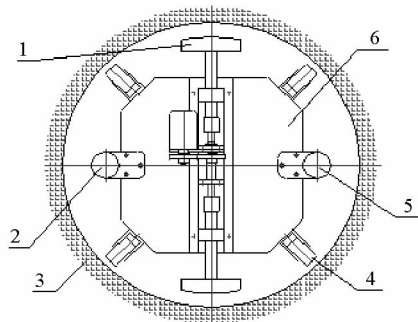
井下音视频采集传输系统将采集到的语音、视频信号通过 Wi-Fi(wireless fidelity)无线定向传输到井上接收操作控制平台,可实现井下 30 m 范围的通信。同时,井上救援人员或落井者的家人通过井上操作控制平台将语音信号采集并经无线定向传输网络传送至井下,以指导落井人员配合救援工作或对其进行安抚。



1. 双向同速转动驱动机构;2. 驱动电机;3. 驱动传动齿轮副;4. 正反螺旋联轴器;
5. 支撑锚杆;6. 导向底座;7. 锚杆头

图 4 机器人定位支撑机构

Fig. 4 The location and supporting mechanism of the robot



1. 定位支撑部件;2. 抱持手臂部件;3. 井壁;
4. 导向滑轮;5. 探接手臂部件;6. 机架

图 5 机器人本体机架结构图

Fig. 5 The body rack of the robot

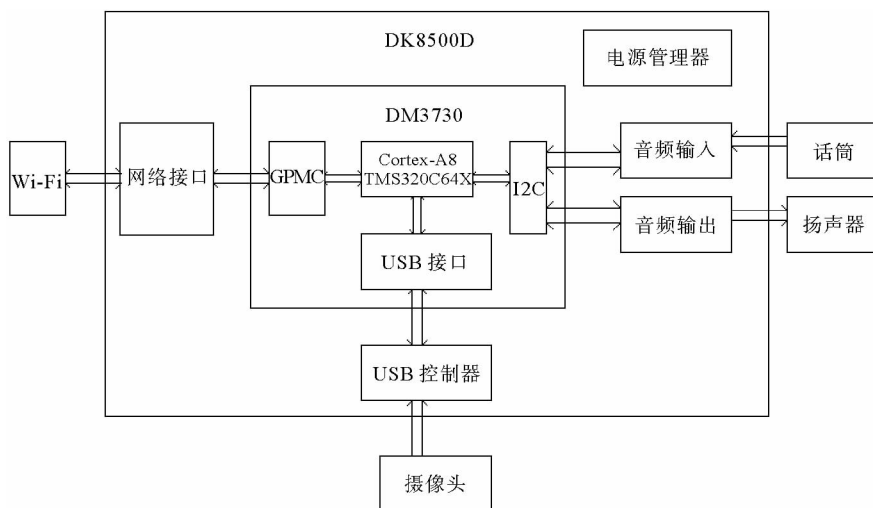


图 6 机器人音视频采集传输系统框图

Fig. 6 Video and audio transmission system of the robot

3.2 驱动控制系统

针对井下机器人各关节直流电机的控制,设计了直流电机驱动控制系统,结构如图 7 所示。

DM3730 将控制信号通过串口发送给 AVR 单片机,经 AVR 单片机处理后输出 PWM(pulse width modulation,脉冲宽度调制)信号给直流电机驱动器,实现对电机的控制。通过改变 PWM 信号的占空比即可实现对机器人各相关自由度执行电机的速度及位置控制,从而完成对落井人员的救助。

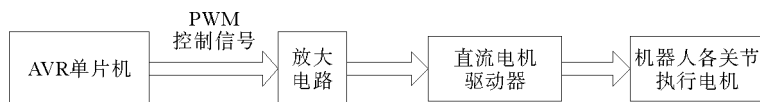


图 7 机器人井下驱动控制系统框图

Fig. 7 Diagram of the drive and control system of the robot

4 试验

为验证机器人救援工作的可行性,用所设计的救援机器人实验室样机进行模拟救援试验,如图 8 所示。试验采用体积相当的玩具娃娃代替儿童,并用钢丝网制作成井筒形状,模拟救援环境。图 8(a)说明机器人进入到井下伸开锚杆机构后对落井儿童进行托起和抱持动作,图 8(b)说明机器人固定好落井儿童后收起支撑锚杆机构,随着提升机构的上升动作将落井儿童救出。

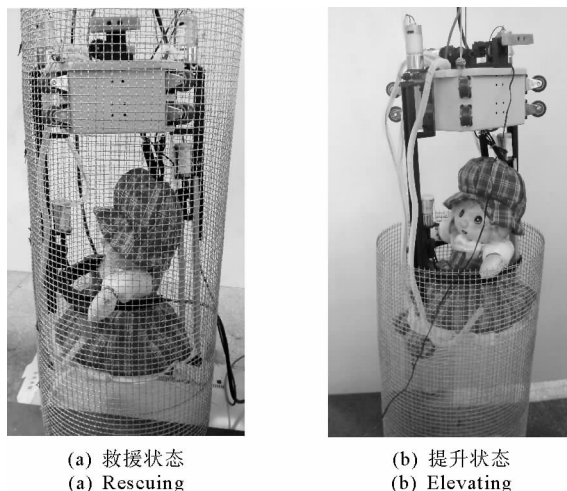


图 8 机器人救援实验

Fig. 8 Rescue experiment of the robot

5 结论

通过试验样机的制作、调试和落井救援现场的模拟,小口径深井救援机器人各部件的结构、功能定位、运动性能、力学性能、动力和能源的选择、控制方法的确定,能够满足救援机器人的整体设计要求。在实际救援中,救助人员不必井下作业,救援时无须大规模土方开挖。

参考文献:

[1]董晓坡,王绪本.救援机器人的发展及其在灾害救援中的应用[J].防灾减灾工程学报,2007,27(1):112-117.

- Dong Xiaopo, Wang Xuben. Development of rescue robot technology and its application in disaster[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27(1): 112-117.
- [2] 刘金国, 王越超, 李斌, 等. 灾难救援机器人研究现状、关键性能及展望[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 1-12.
Liu Jinguo, Wang Yuechao, Li Bin, et al. Current research, key performances and future development of search and rescue robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(2): 1-12.
- [3] 张靖, 康健, 刘然. 多功能小口径竖井(坑洞)救援系统设计方案[J]. 消防技术与产品信息, 2006(9): 24-26.
Zhang Jing, Kang Jian, Liu Ran. Design of multifunctional small caliber vertical well[J]. Fire Technique and Products Information, 2006(9): 24-26.
- [4] 刘立文. 井下救援技术研究[J]. 消防技术与产品信息, 2007(12): 64-66.
Liu Liwen. Rescue techniques researching under the well[J]. Fire Technique and Products Information, 2007(12): 64-66.
- [5] 王传江, 张志献, 孙秀娟, 等. 小口径深井落井救援机器人设计[J]. 矿山机械, 2010, 38(2): 21-24.
Wang Chuanjiang, Zhang Zhixian, Sun Xiujuan, et al. Design of the rescue robot for small caliber deep well falling[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(2): 21-24.
- [6] Wang C J, Sun X J, Zhang Z X, et al. Virtual prototype realization and simulation for small-caliber deep well rescue robot [C]//International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Shanghai, Jan. 6-7, 2011: 1128-1130.
- [7] Wang C J, Jiang H, Zhang Z X, et al. Optimal design for clasp arm of small-caliber deep well rescue robot[C]//International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering. Taiyuan, Aug. 16-18, 2012: 1254-1257.
- [8] 王猛, 李长春, 田希杰. 不完全齿轮换向机构的动力学特性分析[J]. 现代制造技术与装备, 2012(3): 74-76.
Wang Meng, Li Changchun, Tian Xijie. The analysis of incomplete gear reversing mechanism dynamics[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2012(3): 74-76.

(责任编辑: 吕文红)

(上接第 75 页)

- [17] 王宁, 陈民, 郝多虎, 等. 基于 NDVI 估算植被覆盖度的研究: 以滁州市为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2003, 36(5): 51-54.
Wang Ning, Chen Min, Hao Duohu, et al. Based on the estimation of vegetation coverage of NDVI: A case study of Chuzhou City[J]. Geometrics & Spatial Information Technology, 2003, 36(5): 51-54.
- [18] 魏敏, 李国平. 基于 TAL 系统的城市化综合水平测度模型的研究[J]. 系统工程, 2004, 22(7): 50-55.
Wei Min, Li Guoping. Based on the urbanization comprehensive level measure model of TAL system research [J]. Systems Engineering, 2004, 22(7): 50-55.
- [19] 陈菁. 福建省海岸带脆弱生态环境信息图谱研究[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(2): 159-166.
Chen Jing. Fujian coastal zone fragile ecological environment information research[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(2): 159-166.
- [20] 储金龙, 高抒, 徐建刚. 海岸带脆弱性评估方法研究进展[J]. 海洋通报, 2005, 24(3): 80-87.
Chu Jinlong, Gao Shu, Xu Jiangan. Advances in coastal vulnerability assessment method[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(3): 80-87.
- [21] 曹健. 基于 ArcGIS 的三维城市系统开发[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011: 16-22.
- [22] 魏士春. 海岸带湿地资源遥感调查与专题制图研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007: 45-49.
- [23] 徐莉. 基于 GIS 和 RS 的区域生态环境建模与制图[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009: 36-41.
- [24] 张京钊. 基于 LUCC 与 RS/GIS 的济南市生态安全评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2010: 56-64.
- [25] 刘美娟. 基于 GIS 与 RS 的耕地质量评价[D]. 青岛: 山东科技大学, 2011: 62-65.

(责任编辑: 高丽华)