

局域精确定位的工业移动机器人惯性导航方案

管林波¹, 董利达^{1,2*}, 尹俊¹

(1. 浙江大学 信息与电子工程系, 杭州 310027; 2. 杭州师范大学 杭州国际服务工程学院, 杭州 311121)

(*通信作者电子邮箱 lddong2002@163.com)

摘要:为解决工业移动机器人投入使用前需沿路密集布设地面磁条或激光反射点等外部装置的复杂性,以及因工作路线固定而缺少灵活性的问题,提出了基于惯性器件和超声波传感器的局域导航方案。操作人员事先通过遥控器训练机器人从一目标位置沿特定路线运动到另一目标位置,从而生成训练路线。机器人工作在非目标区域,即定位精度要求不高的区域时,按训练路线进行惯性导航;进入到目标区域,即包含目标位置、需精准定位的区域时,利用超声波进行导航。所提方案缩短了使用前的准备周期,同时方便更改工作路线。通过仿真实验,验证了局域范围使用惯性导航和超声波定位相结合的方案是合理可行的。

关键词:移动机器人;惯性导航;局域定位;运动决策;超声波

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

Inertial navigation scheme for industrial mobile robot with local precise positioning

GUAN Linbo¹, DONG Lida^{1,2*}, YIN Jun¹

(1. Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;

2. Hangzhou Institute of Service Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou Zhejiang 311121, China)

Abstract: In order to solve the problem of complexity for laying the ground magnetic, laser reflection point or other devices before industrial mobile robot can come into service, and the inflexibility resulting from the fixed work path, a scheme of industrial mobile robot navigation based on inertial and ultrasonic sensors was proposed. Operator needed to train the robot from one target position moving towards another target position in advance to acquire train path. When the robot worked in non-target area, i. e. the area demanding low location accuracy, it navigated according to the train path based on inertial sensors; When coming into target area, i. e. the area containing target position and demanding high location accuracy, ultrasonic sensors conducted the navigation. The scheme shortened the preparation period, and it was convenient to change work path. The simulation results show that the scheme combining inertial navigation and ultrasonic location is feasible.

Key words: mobile robot; inertial navigation; local location; motion decision; ultrasonic

0 引言

随着传感器技术、信息处理、自动化控制工程以及人工智能等相关技术的发展,移动机器人性能不断完善,正逐步代替人类在危险、恶劣(如辐射、有毒等)等环境下开展作业。近年来,随着工业领域规模化作业的扩大,工业移动机器人的需求急剧增长。常见机器人导航方式有磁导航、激光导航、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)导航、视觉图像导航等多种技术。

磁导航是利用带有磁性的磁条(点)实现引导^[1],目前国内外的大部分 AGV(Automated Guided Vehicle)生产厂商均采用此种导航方式。该技术拥有较高的导航精度、准确性和稳定性,但需要提前铺设磁条或者布设磁点,同时要求磁感应传感器与磁条之间的距离较近。激光导航技术^[2]随着通信技术、微处理器技术以及传感器技术的快速发展而逐步被引入 AGV 系统中。激光导航依靠激光在周围空间的反射来探测外部环境,需要预先布设激光反射点。这两种导航方式都存

在安装复杂、投入工作周期长、成本高等缺点。

室外机器人常用的是 GPS 导航技术^[3],在地球上的任何位置、任何时刻只要能同时观测到 4 颗以上的卫星,就可以得到三维定位、导航和时间信息。但它易受干扰,短时间内信号波动较大,导航定位误差大,在室内等区域有盲区,文献[4-5]给出了相关的介绍。因此,GPS 导航不适用于室内环境下的工业机器人导航。视觉导航利用摄像机捕捉环境内的标志物图像(地标信息)来进行精确定位和导航(如文献[6]讨论融合来自激光测距与双目视觉信息,并利用固定地标来提高定位精度),但此种导航方式实时性较差,识别精度和可靠性较低,目前处于理论研究为主的阶段,如文献[7-9]所述,实际应用的相关报道较少。

为解决室内工业移动机器人导航存在的安装复杂、投入工作周期长、成本高等问题,本文提出一种基于惯性器件和超声波传感器的工业移动机器人导航方案。在投入使用前,操作人员只需使用遥控器对机器人进行简单训练,以获取工作过程中的运动路线,作为机器人将来在非目标区域运行时的

收稿日期: 2013-10-18; **修回日期:** 2013-12-12。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61071062); 浙江省自然科学基金资助项目(Y12F020155); 杭州师范大学校长基金资助项目(2013JGJ001)。

作者简介: 管林波(1988-),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向:移动机器人局域导航、嵌入式 Linux; 董利达(1970-),男,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向:移动机器人局域导航、无线传感器网络; 尹俊(1990-),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向:惯性导航算法。

工作路线;在目标区域则利用超声波进行精确定位。该方案具有无需密集布设地面磁条或激光反射点等外部装置、方便更改工作路线的优点。

1 导航技术概述

惯性导航是一种航位推算导航方式,即从已知点位置出发根据连续测得的运动载体姿态以及位移变化推算出其之后的载体连续位置,其计算方法如下式^[10]所示:

$$\begin{cases} x_n = x_{n-1} + \Delta R_{n-1} \sin \theta_{n-1} \\ y_n = y_{n-1} + \Delta R_{n-1} \cos \theta_{n-1} \\ \theta_n = \theta_{n-1} + \Delta \theta_n \end{cases} \quad (1)$$

其中:\$(x_n, y_n)\$和\$\theta_n\$分别为载体在第\$n\$时刻的位置坐标和航向角;\$\Delta R_{n-1}\$和\$\Delta \theta_n\$分别为载体从第\$n-1\$时刻位置\$(x_{n-1}, y_{n-1})\$到第\$n\$时刻位置\$(x_n, y_n)\$的位移变化量和航向角变化量。

惯性导航是一种不依赖于任何外部信息,也不向外部辐射能量的自主式系统,具有如下主要优点:1)隐蔽性好且不受外界电磁干扰的影响;2)可全天候、全球、全时间地工作于空中地球表面乃至水下;3)能提供位置、速度、航向和姿态角数据,所产生的导航信息连续性好而且噪声低;4)数据更新率高、短期精度和稳定性好。惯性导航的以上特点决定了它能够较好地应用于电磁干扰严重、湿度大的工业环境下的机器人导航,但由于会产生累积误差导致无法单独依靠惯性器件来进行长时间导航。

在目标区域布设超声波装置进行精确定位,可及时消除非目标区域惯性导航的累积误差,从而保证惯性器件能长时间服务于机器人导航工作。此外,对于一些工业机器人(如服务机器人)来说,通常当机器人自主移动到目标区域后,在局部坐标系下机器人自身需要一定的定位精度,才能准确抓取手臂工作空间内任意位置的物体。超声波的定位误差一般不大于6 cm,因此满足绝大多数工业移动机器人的定位需求。

目前有很多关于超声波定位的相关技术研究^[11-12],其技术方案可直接应用到本文介绍的导航系统中。本文简要介绍其工作机理。

当移动机器人进入目标区域后,可由超声波三点定位获得机器人在区域内的坐标\$(x, y)\$,如图1所示。

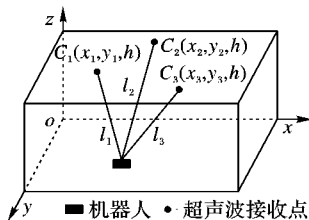


图1 超声波定位原理示意图

为简化问题,将目标位置取为原点\$O\$,将超声波接收点安装在同一个平面,其计算公式^[13]如下:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + h^2 = l_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + h^2 = l_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + h^2 = l_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中:\$h\$为超声波接收点距地面的垂直距离;\$l_1, l_2, l_3\$为超声波接收点到机器人的距离,由超声波测距得到。根据式(1)可以不断求得运动中机器人的位置坐标\$(x, y)\$,而目标位置的坐标\$O(0, 0)\$是已知的,因此可较容易地通过闭环控制进行路径

规划,使得机器人从当前位置逐步靠近目标位置。

2 系统组成与工作原理

工业移动机器人导航系统组成如图2所示。

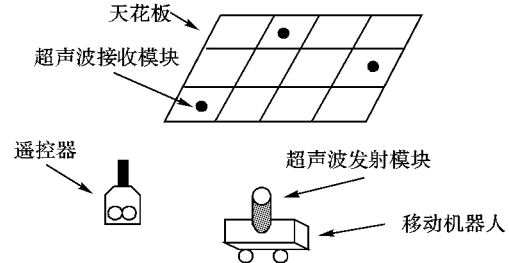


图2 导航系统组成

导航系统由装有超声波发射模块的移动机器人、安装在目标区域天花板上的三个超声波接收模块和遥控器等组成。其中,超声波发射/接收模块包含无线传输模块,移动机器人机体上还装有编码器和陀螺;超声波接收模块只负责测距,并将距离返回给发射点,由发射点计算出坐标;遥控器用来在机器人投入使用前对机器人进行训练,从而获取运动路线。

工业移动机器人导航系统主要的软件模块如图3所示。

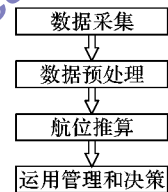


图3 导航系统主要软件模块

数据采集模块采集的是来自陀螺的惯性参数(如式(1)中的\$\Delta \theta_n\$)、编码器的运动参数(如式(1)中的\$\Delta R_{n-1}\$)和超声波接收模块发送过来的距离信息。由于在工业环境下,污染比较严重,因此不宜使用光电编码器,而考虑采用磁编码器。

采集到原始数据后,数据预处理模块对数据进行预处理工作,如定点数与浮点数的转换、数据有效位数的处理及数据有效性的判断等,处理完成后交给航位推算模块。

航位推算模块需提供运动距离和运动状态给运动管理和决策模块,以便运动管理和决策模块下发正确的运动指令给执行机构。

运动管理和决策模块是本文的核心内容,它包括非目标区域利用惯性器件实施的训练式导航和目标区域利用超声波定位实施的导航。当机器人沿训练得到的路线进入目标区域后,就借助于超声波定位进行导航,从而到达目标位置。机器人的工作模式也因此相应地分为训练模式和任务模式。运动管理和决策模块负责训练模式下运动路线的管理及任务模式下的决策,其示意图如图4所示。

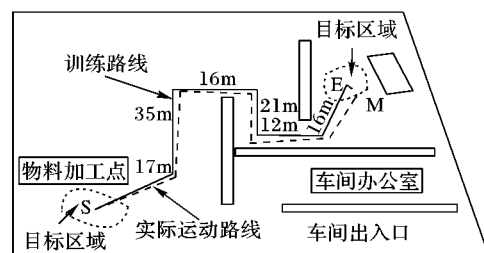


图4 机器人运动管理和决策工作机理示意图

训练模式下,操控人员通过遥控器按一定的规则(如距

离最近或易于操作等)可形成训练路线 $S \rightarrow E$ 。 S 、 E 是目标位置,机器人在目标位置进行物料抓取等操作; S 、 E 所在的虚线区域分别为目标区域。训练过程中将 S 作为训练起始点, E 作为训练终点。操作人员只要训练机器人从 S 点运动到 E 点,返回路线会自动逆向生成。此种情况下运动管理和决策模块记录 $S \rightarrow E$ 路线为:直行 17 m,左转 40° ,直行 35 m,右转 90° ,直行 16 m,右转 90° ,直行 21 m,左转 90° ,直行 12 m,左转 70° ,直行 16 m。逆向生成的 $E \rightarrow S$ 路线为:直行 16 m,右转 70° ,直行 12 m,右转 90° ,直行 21 m,左转 90° ,直行 16 m,左转 90° ,直行 35 m,右转 45° ,直行 17 m。为消除训练过程中抖动的影响,保证运动记录的准确性,只有当测得的机器人转弯角度大于某设定阈值(如 3°)时才认为机器人发生转弯,其流程如图 5(a)所示。

任务模式下,当机器人在目标区域外运动时,按训练得到的运动路线执行。由于惯性器件等误差的存在,机器人实际运动路线可能会稍稍偏离训练的运动路线,但只要保证机器人能进入目标区域即可。一旦机器人进入到目标区域后(如图 4 中机器人到达 M 点后),立即放弃正在执行的运动记录指令,而根据超声波定位信息进行导航,直到机器人到达目标位置(如图 4 中的 E 点)。当机器人在目标位置完成相应任务后,又继续读取运动记录并执行,如此不断循环,其流程如图 5(b)所示。

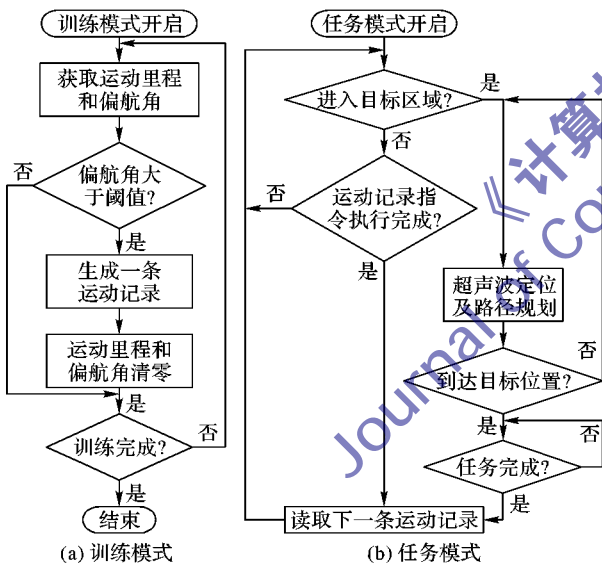


图5 不同模式下的运动管理和决策模块流程

考虑到规模化作业的工业环境下,在机器人所训练的运动路径中一般不会突然出现阻挡机器人运动的障碍物,此外在机器人开始工作前还可以人为地检查障碍物,因此,采取训练的方式得到固定的运动路线是合理的。

3 仿真与分析

利用超声波定位对目标区域中的机器人进行导航的技术已比较成熟,因此本次仿真主要是为了观察机器人在非目标区域进行训练式导航过程中,实际运动路线与基准训练路线间的偏差。仿真过程以图 4 中的训练路线为参照对象,其中每段路线的距离及转弯角度具体参见图 4 的说明部分,并假设小车以 1 m/s 的速度运动,编码器和 mems 陀螺的测量误差为高斯白噪声。仿真中以分段函数作为训练路线 SE/ES 的表达式,在编码器所测得的运动里程数据中加入信噪比

(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 3 dB 的高斯白噪声,在陀螺所测得的偏航角数据中加入高斯白噪声对运行时间的积分。仿真软件为 Matlab,机器人装配有 MEMS 陀螺 ADIS16405 和磁编码器 AS5045 ASST,陀螺的偏置稳定性为 $0.007^\circ/\text{s}$ 。仿真结果如图 6 所示,图 6(a) 为从目标位置 S 到目标位置 E 两次仿真生成的两条曲线与基准训练路线,图 6(b) 为从目标位置 E 到目标位置 S 两次仿真生成的两条曲线与基准训练路线。

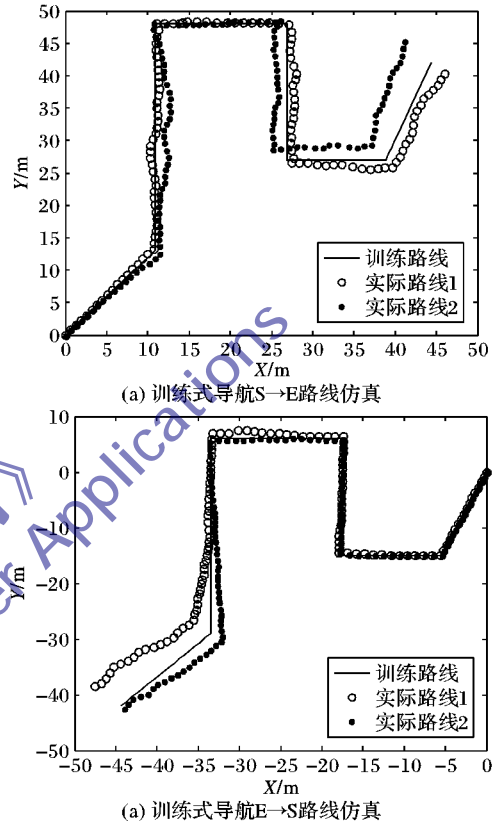


图6 $S \rightarrow E$ 和 $E \rightarrow S$ 路线仿真

由图 6 可得知,由于传感器存在一定误差,机器人的实际运动路线会随路程增加而逐渐偏离训练路线,但其运动趋势仍能跟随训练路线,特别是路程比较短的情况下实际路线与训练路线基本重合。因此,机器人按训练路线到达后的位置离目标位置的误差是处于一定范围内的,所进行的 100 次仿真结果见图 7,其中横坐标表示距目标位置的误差区间(单位: m),纵坐标表示落在某个区间的次数。由图 7 可知,路程为 117 m 时,机器人离目标位置的误差大多数落在 $[0,3]$ 区间内,最大误差不超过 6 m 。由此,可根据路程距离及传感器精度特点,选择合适的超声波传感器并合理安装三个超声波接收节点的相对位置,以确保目标区域足够大,即可保证机器人能顺利进入目标区域,从而进行精确定位。

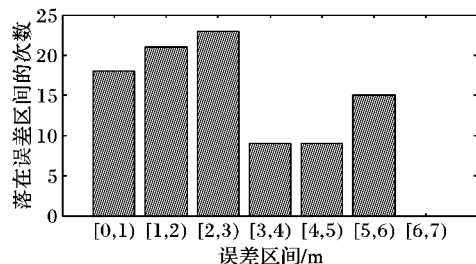


图7 117 m 距离下机器人与目标位置误差分布

4 结语

本文基于惯性导航并结合超声波定位技术提出了工业环境下一种新型的移动机器人导航方案,不需要沿路密集布设磁条、激光反射点等外部装置,而是通过事先学习训练的方式获取非目标区域的工作路线,仅在目标区域布设超声波节点进行精确定位,从而节约了成本且降低了移动机器人运作的复杂性,并通过仿真对方案的有效性进行了初步验证。在以后的研究中,可以使用视觉即时定位与地图构建(Simultaneous Localization And Mapping, SLAM)代替超声波技术进行目标区域的精确定位,从而解决某些环境下目标区域不便安装超声波节点的问题。

参考文献:

- [1] LEE S-Y, YANG H-W. Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2012, 28(3): 425-436.
- [2] HUMBERTO M-B, DAVID H-P. Development of a flexible AGV for flexible manufacturing systems [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2010, 37(5): 459-468.
- [3] KUMAR G, RAO G. GPS signal short-term propagation characteristics modeling in urban areas for precise navigation applications [J]. *Positioning*, 2013, 4(2): 192-199.
- [4] WANG L, ZHANG Y. GPS protection and technique of interference detection and location [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2012, 28(6): 32-34. (汪立萍, 张益龙. GPS 防护及干扰监测与定位技术研究[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(6): 32-34.)
- [5] BEYERLE G, RAMATSCHI M, GALAS R. A data archive of GPS navigation messages [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 35-41.
- [6] DU Z, WU H. Research of mobile robot slam based on laser range finder and binocular vision data fusion [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(1): 180-183. (杜钊君, 吴怀宇. 基于激光测距与双目视觉信息融合的移动机器人 SLAM 研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(1): 180-183.)
- [7] BOWENS S R, GLATT D P, PRATT S C. Visual navigation during colony emigration by the ant *Temnothorax rugatulus* [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(5): 64-67.
- [8] ZHU A, YANG S X. Neurofuzzy-based approach to mobile robot navigation in unknown environments [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2007, 37(4): 610-621.
- [9] YAN R, WANG H, YANG Y. Monocular vision navigation and control of mobile robot [J]. *AASRI Procedia*, 2012, 3: 707-714.
- [10] ZHANG L, PAN C, LIU Z. A new method of dead reckoning for differential drive mobile robots [J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition*, 2010, 33(11): 1605-1609. (张利, 潘承毅, 刘征宇. 差动驱动机器人的一种航迹推算定位方法[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(11): 1605-1609.)
- [11] LI C, SU H. An ultrasonic positioning system [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2013, 32(2): 39-44. (李昌禄, 苏寒松. 超声波定位系统的研究[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(2): 39-44.)
- [12] HAN X, HAN X. A new method of localization only based on ultrasonic technique [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25(2): 25-28. (韩学超, 韩新春. 一种仅基于超声波技术定位的新方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(2): 25-28.)
- [13] LI G, GUO S, HE Y. Study on precise positioning method of a service robot based on three-point location [J]. *Microcomputer Information*, 2009, 25(10): 180-181. (李国林, 郭帅, 何永义. 基于三点定位的服务机器人精确定位方法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(10): 180-181.)

(上接第 1204 页)

- [2] HOCHBERG M. Generalized multicomponent systems under cannibalization[J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1973, 20(4): 585-605.
- [3] SHERBROOKE C C. METRIC: a multi-echelon technique for recoverable item control[J]. *Operations Research*, 1968, 16(2): 122-141.
- [4] MUCKSTADT J A. A model for a multi-item, multi-echelon, multi-indenture inventory system[J]. *Management Science*, 1973, 20(4): 472-481.
- [5] FISHER W W. An improved simulation model for cannibalization policy performance comparison in a complex maintenance system [J]. *Simulation*, 1989, 52(4): 154-164.
- [6] FISHER W W. Analytical performance estimation for complex maintenance systems[J]. *Simulation*, 1988, 51(6): 222-226.
- [7] LI L, ZHANG J, ZHANG T, et al. Mission oriented cannibalization policy problem and its solving algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(7): 97-104. (李玲伟, 张建军, 张涛, 等. 面向任务的拼修策略问题及求解算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(7): 97-104.)
- [8] ZHOU W, JIANG P, LIU Y, et al. A spare allocation model for repairable systems considering correlated spare demands [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012, 34(3): 68-73. (周伟, 蒋平, 刘亚杰, 等. 考虑需求相关的可修复系统备件配置模型[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 68-73.)
- [9] LYU X, YU Y, ZHANG L, et al. Selective maintenance model considering cannibalization and multiple maintenance actions [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 360-366. (吕学志, 于永利, 张柳, 等. 考虑拼修与多种维修活动的维修任务选择模型[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 360-366.)
- [10] RUAN M, LI Q, PENG Y, et al. Evaluation of equipment system availability for multi-echelon maintenance supply with cannibalization [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(4): 658-665. (阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 串件拼修对策下多级维修供应的装备系统可用度评估[J]. 航空学报, 2012, 33(4): 658-665.)
- [11] LUO Y, RUAN M, LI Q. Evaluation of availability for incomplete cannibalization systems under multi-echelon maintenance supply [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(6): 1182-1186. (罗伟, 阮旻智, 李庆民. 多级维修供应下不完全串件系统可用度评估[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(6): 1182-1186.)
- [12] SHERBROOKE C C. *Optimal inventory modeling of system: multi-echelon techniques* [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2004.
- [13] WANG N, KANG R, CHENG H. Study on the dynamic characteristics of spare inventory based on Markov process [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(7): 984-988. (王乃超, 康锐, 程海龙. 基于马尔科夫过程的备件库存动态特性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(7): 984-988.)