

北斗/惯导深组合系统捕获与环路控制研究

王焕浩¹, 曾庆化¹, 孟 骞¹, 冯绍军²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院导航研究中心, 南京 210016;

2. 英国帝国理工交通研究中心, 伦敦 英国 SW7 2AZ)

摘要:为适应我国对北斗卫星日益广泛的应用和用户对于高精度、强干扰能力下的应用需求,提出了一种北斗/惯导深组合系统捕获与环路控制方案;通过6 ms并行码相位搜索捕获方法成功捕获卫星,同时利用惯导与接收机环路的高度耦合机制实现载波环和码环的控制;通过仿真试验表明:该方法能够成功实现北斗卫星信号的捕获与接收机环路控制,且跟踪性能优于传统接收机环路。

关键词:北斗卫星;深组合系统;捕获;环路控制

本文引用格式:王焕浩,曾庆化,孟骞,等.北斗/惯导深组合系统捕获与环路控制研究[J].兵器装备工程学报,2016(3):77-81.

Citation format:WANG Huan-hao,ZENG Qing-hua,MENG Qian,et al. Study on Capture and Loop Control of Deeply BD/INS Integrated System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2016(3):77-81.

中图分类号:U666.1;TN967.1

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2016)03-0077-05

Study on Capture and Loop Control of Deeply BD/INS Integrated System

WANG Huan-hao¹, ZENG Qing-hua¹, MENG Qian¹, FENG Shao-jun²

(1. Navigation Research Center of College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Centre for Transport Studies, Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK)

Abstract: In order to meet the demands of the increasingly wide applications of Beidou and the requirements of the users for high accuracy and strong interference ability, a method of capture and loop control for deeply BD/INS integrated system was proposed. Search method used 6 ms parallel code phase was used to capture the satellites successfully, and the carrier and code loop were controlled by the highly coupling between tracking loop and INS navigation system. The simulation results indicate that this method can capture the Beidou signal and control the tracking loop, and the tracking performance is superior to the traditional receiver loop.

Key words: Beidou satellite; deeply integrated system; capture; loop control

北斗卫星导航系统是我国自行设计的一种全球导航系统,其致力于向全球用户提供高品质的定位、导航和授时服务。目前,北斗系统已覆盖亚太地区,预计到2020年左右能提供全球范围内导航服务。我国于2012年12月27日发布了北斗系统空间信号控制文件,内容主要包括北斗系统概述、信号规范、导航电文几部分内容,各高校和院所基于此已

开展对北斗卫星相关研究^[1]。

受高动态、抗干扰、高精度导航性能需求的推动,卫星/惯导深组合技术成为研究热点。在传统的松、紧组合系统中,接收机通道相互独立,对环路的控制完全由环路内部鉴相器产生。而深组合系统是由已知的惯导解算结果推测跟踪环路参数,各通道之间实现信息共享,其核心思想是将惯

性导航与卫星接收机的跟踪环路紧密结合在一起,有效提升跟踪环路性能^[2]。目前,国际上许多机构如 Draper 实验室利用模拟卫星信号和惯导数据验证了深组合在抗干扰方面相对于紧组合能提高 15 dB,美国的 Honeywell 公司和 Rockwell Collins 公司组建深组合研究团队,在抗干扰接收机上采用矢量跟踪深组合算法,研制了实物样机。国外在深组合方面技术成熟,应用趋于产品化^[3]。国内的一些科研机构如清华大学、南京航空航天大学、西安 618 所等都对深组合开展了积极的研究,但基本都处于算法验证阶段,还没有与深组合相关的成熟产品出现。

深组合系统主要可分为卫星信号的捕获,跟踪环路的外部辅助控制和深组合滤波器观测量的提取及对惯导的修正三大部分^[4]。本文主要对北斗信号的捕获及跟踪环路的控制这两块内容进行说明。

1 北斗信号的捕获

1.1 北斗信号的 NH 码调制

北斗卫星系统有三种类型的卫星,其中 MEO 和 IGSO 卫星播放 D1 导航电文,GEO 卫星播放 D2 导航电文。D2 导航电文的调制机制与 GPS 相同,而 D1 导航电文上面调制了 NH 码。D1 导航电文速率为 50 bps,一个信息比特持续 20 ms,这期间测距码重复 20 次。D1 导航电文上采用 20 ms 码宽的 NH 码来调制导航电文中的一个信息位,称之为二次编码。调制过程采用 20 比特的 NH 码(0,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,0)中的每一比特和 1 ms 扩频码进行调制^[5],如图 1 所示。

原导航电文	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
NH 码	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	
调制后电文	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	

图 1 NH 调制后的北斗导航电文

假设长度为 20 ms 的 1 比特的导航电文由 20 个 1 组成(也可是 20 个 0),经过 NH 码的调制(调制机制为两信号进行异或),得到调制后的导航电文(1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,0,1,0,1,1,0,0,0,1)。NH 码能降低各卫星信号之间的相关性,提高信号的抗干扰能力,但也增加了信号的复杂性,给接收机尤其是捕获环节增加了很大的难度。

1.2 6 ms 并行码相位搜索捕获方法

捕获的目的是获得可见星以及相应的载波频率和码相位的估计值,本文采用并行码相位搜索捕获方法,通过傅里叶变换实现相关操作。

长度为 N 的序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的离散傅里叶变换为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

二者的循环互相关序列为

$$Z(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(m) y(m+n) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(-m) y(m-n) \quad (2)$$

去掉比例因子 $1/N$, $Z(n)$ 的 N 点离散傅里叶变为

$$Z(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) e^{j2\pi km/N} \sum_{n=0}^{N-1} y(m+n) e^{-j2\pi k(m+n)/N} \quad (3)$$

得到式(3)后,用傅里叶逆变换得到时域表达式。图 2 为并行码相位捕获流程图。

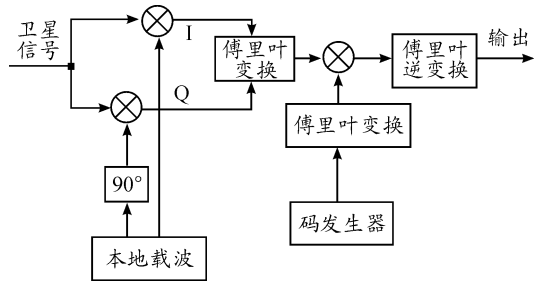


图 2 并行码相位捕获

天线接收到的北斗卫星信号,与本地产生的载波信号相乘得到 I 支路信号,与 90° 相移的本地载波相乘得到 Q 支路信号,二者组合得到复数信号 $x(n) = I(n) + jQ(n)$,对该信号进行傅里叶变换后,与傅里叶变换后的本地码信号相乘,输出结果经过傅里叶逆变换转化为时域信号,结果中若出现峰值,表示捕获到当前码对应的卫星^[6]。

捕获成功的前提是进行捕获的数据不含比特跳变。传统的 GPS 的捕获是采用一段连续的 2 ms 的卫星信号,分为两个 1 ms 信号,分别进行捕获操作。由于 GPS 信号的一个导航电文中全是 1 或者 0,不存在比特跳变,两个导航电文之间可能存在比特跳变,故 2 ms 的数据中能够保证其中有 1 ms 的数据不存在比特跳变。如图 3 所示,北斗由于采用 NH 码调制,导致一个导航电文中存在多次比特跳变,传统的方法已不适用。对于北斗信号,经过统计方法可以得到,最少应截取 6 ms 的北斗卫星信号,分成 6 个 1 ms 信号进行捕获操作,则不论信号的起点位于何处,都能保证这 6 个 1 ms 的数据中至少有一个 1 ms 的信号是完全不含任何比特跳变,这样就能成功实现捕获。如图 3 所示,不论数据起点位于何处,6 ms 的数据中都能保证其中有 1 ms 数据不含比特跳变(图 3 中阴影所示),这样对于可见卫星才能从输出结果中得到相关峰值,从而确定卫星号和载波频率与码相位的估计值。

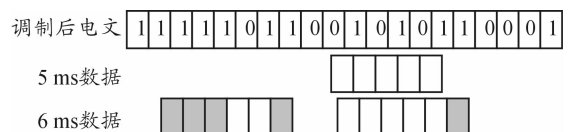


图 3 连续多毫秒数据捕获

2 深组合跟踪环路的外部控制

跟踪的主要目的是时刻保持本地的载波频率和码相位值与卫星信号一致,进而从卫星信号中解调出导航电文,解调方案(图4)如下:

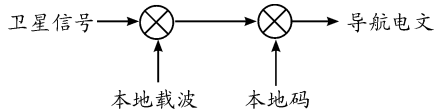


图4 卫星信号解调

首先,输入信号与本地载波相乘剥离载波,接下来再与本地码相乘,剥离码,剩下的即为导航电文。跟踪模块需要得到载波频率与码相位增量,以此来产生本地载波和本地码。传统接收机的复制载波频率和码相位增量由接收机环路内部通过鉴相器获得,而深组合的环路与惯导高度融合,通过惯导的位置,速度以及卫星星历对载波频率和码相位进行估计,将原接收机的闭环环路断开,各个通道之间不再独立^[7]。这样环路能充分利用导航信息,且跟踪性能好的环路可以辅助性能差的环路,从而提高接收机的跟踪性能。

2.1 载波环控制量分析与计算

接收机本地载波频率由中频、捕获到的载波初始多普勒频移、锁相环调整量构成,即:

$$f_{\text{carr}} = f_l + f_a + f_{\text{NCO}} \quad (4)$$

式(4)中, f_l 为中频频率, f_a 捕获到的载波初始多普勒频移, $f_l + f_a$ 称为载波中心频率, f_{NCO} 为跟踪环路产生的载波 NCO, 即锁相环产生的调整量。

根据惯导计算得到的载体在 ECEF 坐标系中的位置 P_r 、速度 V_r 以及根据星历计算得到的卫星位置 P_s 、速度 V_s 来计算环路多普勒频移量。载体速度及卫星速度在二者径向上的投影分量为^[8]

$$v_e = (V_r - V_s)^T \cdot \frac{P_r - P_s}{|P_r - P_s|} \quad (5)$$

惯导计算出的载波跟踪环的多普勒频移为

$$f_{dl} = \frac{v_e}{c} \cdot f_{L1} \quad (6)$$

式(6)中, c 为光速, f_{L1} 为载波 $L1$ 的频率。可以看出, f_{dl} 与深组合导航系统输出的载体位置和速度有关,其中包含惯导的信息量。将载波多普勒频移送入接收机环路中,控制接收机对载波信号的跟踪。复制载波信号频率的计算如下式:

$$f_{\text{rep}} = f_l + f_{dl} \quad (7)$$

通过多次实验发现,利用载体预测的多普勒频移 f_{dl} 与原环路多普勒频移之间存在一个较为稳定的频率偏差,而该频率偏差与接收机解算得到的钟漂频率 Δf 基本一致,因此在惯导预测的多普勒频移上补偿上接收机的钟漂频率^[9],即

$$f_{\text{rep}} = f_l + f_{dl} + \Delta f \quad (8)$$

利用惯导推算的载波频率 f_{rep} 代替原接收机的闭环计算

的载波频率 f_{carr} 来产生本地载波。

2.2 码环控制量分析与计算

信号接收时间 t_u 可以直接在卫星接收机时钟上读出。信号发射时间可由下式推算获得:

$$\hat{t}_s = t_u + \Delta t - t_{dl} = t_u + \Delta t - \frac{|\hat{P}_r - P_s|}{c} \quad (9)$$

式(9)中 Δt 为环路相关积分时间间隔, t_{dl} 为惯性导航结果估计的信号传输延迟时间,为了对复制码的产生进行控制,可通过间接计算码相位增量的方法调整本地复制码的产生,设 $k+1$ 和 k 时刻推算的信号发射时间分别为^[10]

$$\begin{aligned} \hat{t}_{s,k+1} = t_{u,k+1} - \frac{|\hat{P}_r - P_s|_{k+1}}{c} = \\ TOW + (30w + b) \times 0.020 + \\ c \times 0.001 + \frac{\bar{\Phi}_{BD,k+1}}{f_{BD}} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \hat{t}_{s,k} = t_{u,k} - \frac{|\hat{P}_r - P_s|_k}{c} = \\ TOW + (30w + b) \times 0.020 + c \times 0.001 + \frac{\bar{\Phi}_{BD,k}}{f_{BD}} \end{aligned} \quad (11)$$

TOW 为以秒为单位的周内时, w 为当前子帧中接收到的整个导航电文数据码的字数, b 为当前字中已经接收到电文的比特数, $\bar{\Phi}_{BD}$ 为惯导预测的码相位值。将以上两式相减,得到码相位增量:

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{BD,k+1} - \bar{\Phi}_{BD,k} = (t_{u,k+1} - t_{u,k}) \cdot f_{BD} - \\ \frac{|\hat{P}_r - P_s|_{k+1} - |\hat{P}_r - P_s|_k}{\lambda_{BD}} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中, λ_{BD} 为测距码波长。通过载体位置与卫星位置可以计算得到惯导的伪距 ρ_r , 通过光速与信号传播时间相乘可以得到接收机伪距 ρ_B , 二者的差值 ρ 与码片误差 γ 之间存在如下关系:

$$\gamma = \frac{\rho_l - \rho_B}{c} \cdot f_{BD} \quad (13)$$

在式(12)中得到的码相位增量中减去码片误差,可以得到精确化的码相位增量 $\bar{\phi}$ 的预测值:

$$\begin{aligned} \bar{\phi} = (t_{u,k+1} - t_{u,k}) \cdot f_{BD} - \frac{|\hat{P}_r - P_s|_{k+1} - |\hat{P}_r - P_s|_k}{\lambda_{BD}} - \gamma \end{aligned} \quad (14)$$

3 北斗/惯导深组合系统仿真实现

3.1 仿真条件

仿真时间为 48 s; 惯性器件数据由设定航迹通过仿真生成,按照中低精度惯导的误差模型设置仿真参数如下:陀螺仪常值漂移为 $8 (^{\circ})/h$, 白噪声均方差为 $2 (^{\circ})/h$, 一次项系数为 5×10^{-5} ; 加速度计常值零偏为 $800 \mu g$, 白噪声均方差为

260 μg ,一次项、二次项系数分别为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{g}$ 、260 μg ;使用中频信号采样器通过天线采集北斗卫星数据,捕获门限值设定为3,载波环噪声带宽为20 Hz,阻尼因子为0.7,码环噪声带宽为2 Hz,阻尼因子为0.7;为方便对比,接收机跟踪设置两种模式:传统的独立跟踪模式和和深组合跟踪模式。

3.2 北斗卫星信号捕获

图5为捕获结果图,将捕获的门限值设定为3(门限值若设定太低将导致难以持续跟踪),可看到卫星号为1,3,4,5,8,11,12的北斗卫星被成功捕获。表1为捕获到的卫星的载波频率和码相位(0~16 368)的值。图6分别为3号与6号北斗卫星捕获结果关于载波频率,码相位和捕获峰值的三维搜索图,可以看到3号卫星出现了明显的峰值,代表捕获成功,而6号卫星并未出现峰值,表示此时未捕获该卫星。

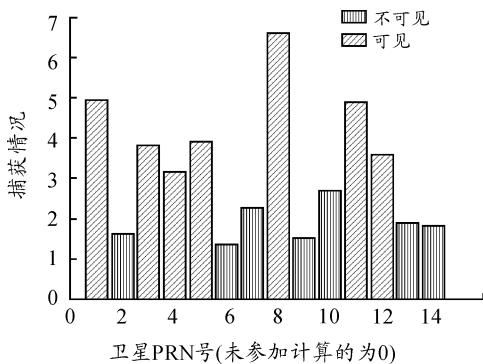


图5 可见星与不可见星

表1 可见星的载波频率与码相位

卫星号	载波频率/Hz	码相位
1	4.131 34e+006	4 793
3	4.131 50e+006	13 261
4	4.131 38e+006	11 294
5	4.131 46e+006	13 261
8	4.131 50e+006	11 236
11	4.130 92e+006	8 208
12	4.128 80e+006	7 196

3.3 深组合环路外部控制

图7中左图为传统接收机的环路跟踪量,右图为深组合的环路跟踪量。

图7为环路相关值,较大的值为IP,代表导航电文,深组合的IP值比传统环路更加平滑,毛刺明显降低。较小的值为QP,代表环路的噪声,深组合的环路噪声明显低于传统环路。

图8和图9为载波环和码环鉴相器的输出,它们分别代表环路的跟踪误差。从图8、图9中可以看出,深组合环路的跟踪误差明显比传统环路小。

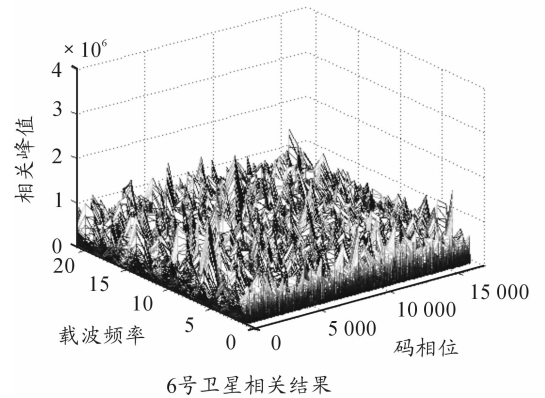
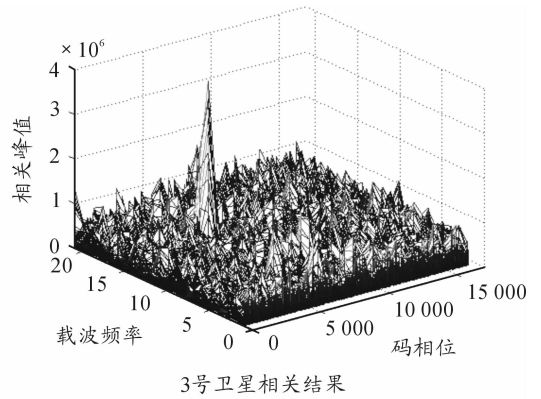


图6 3号与6号卫星捕获结果图

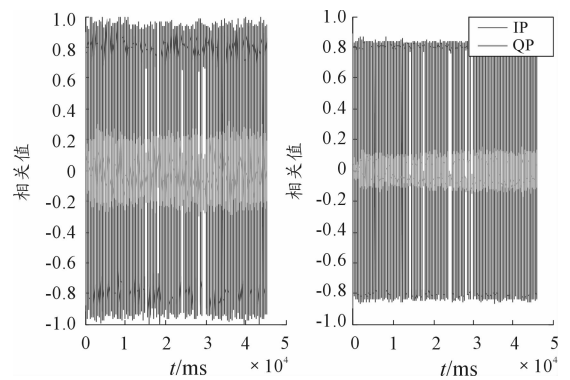


图7 环路相关值

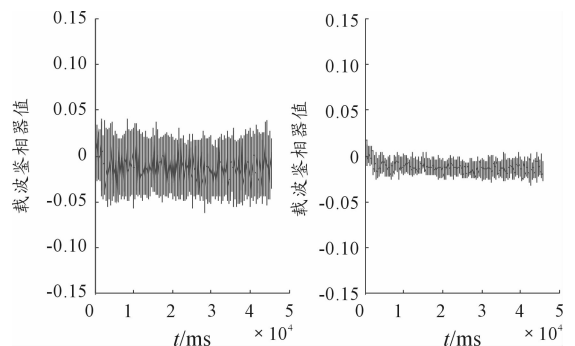


图8 载波环鉴相器输出

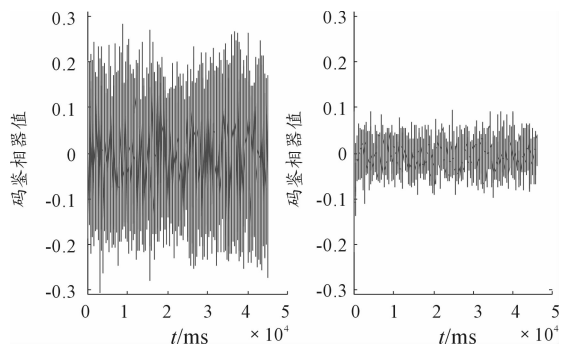


图9 码鉴相器输出

4 结论

本文提出的北斗/惯导深组合捕获和跟踪的控制方法,一方面,利用6 ms并行码相位搜索捕获的方法,能够在捕获过程中规避NH码影响;另一方面,通过中低精度惯导的解算结果推算接收机跟踪环路控制量,在惯导精度不高的情况下实现了环路的持续跟踪。试验表明,该方法能够成功实现北斗卫星的捕获并且提升跟踪环路的性能。

参考文献:

[1] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.

- [2] 杨洋. GPS/SINS 深组合导航中的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [3] TANG X, FALLETTI E, PRESTI L L. Fast nearly ML estimation of doppler frequency in GNSS signal acquisition process[J]. 2013, 13: 5649-5670.
- [4] ZHAO S, LU M, FENG Z. Implementation and performance assessment of a vector tracking method based on a software GPS receiver[J]. Journal of Navigation, 2011, 64(S1): S151-S161.
- [5] 董俊杰. 基于 Matlab 的北斗二代 B1 频点软件接收机研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [6] 陈建卫. 基于 NS210-B 的北斗卫星导航系统 B1 信号的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [7] 王新龙, 于洁. 基于矢量跟踪的 SINS/GPS 深组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(6): 710-717.
- [8] 谢非, 刘建业, 李荣冰, 等. 基于环路相关积分观测的 SINS/GPS 深组合导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(4): 472-477.
- [9] 何晓峰. 北斗/微惯导组合导航方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- [10] GUSTAFSON D, DOWDLE J, FLUECKIGER K. A High Anti-Jam GPS based Navigator[C]. Proceedings of ION National Technical Meeting, Anaheim, USA, 2000.

(责任编辑 杨继森)

(上接第 62 页)

参考文献:

[1] 代东升, 贾迪阳, 谢峰. 面向装备保障的数据体系分析研究[J]. 四川兵工学报, 2015(6): 58-60.

[2] 王向博, 贾红丽, 刘钢, 等. 基于数据挖掘的复杂装备维修辅助决策研究[J]. 计算机与数字工程, 2012, 40(8): 142-145.

[3] 林平, 刘永辉, 陈大勇. 军事数据工程基本问题分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2012, 26(1): 14-17.

[4] BENKHELIFA E, WELSH T, TAWALBEH L, et al. Creating evolving user behavior profiles automatically[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2012, 24(5): 854-867.

[5] 余孟杰. 产品研发中用户画像的数据建模[J]. 设计艺术研究, 2014, 4(6): 60-64.

- [6] BENKHELIFA E, WELSH T, TAWALBEH L, et al. User profiling for energy optimisation in mobile cloud computing [J]. Procedia Computer Science, 2015, 52: 1159-1165.
- [7] DAM J W, VELDEN M. Online profiling and clustering of Facebook users[J]. Decision Support Systems, 2015, 70: 60-72.
- [8] 李林, 吴跃, 叶茂. 基于概率图模型的图像整体场景理解特征工程综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(12): 3542-3550.
- [9] 张学工. 模式识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [10] 申德荣, 于戈, 王习特, 等. 支持大数据管理的 NoSQL 系统研究综述[J]. 软件学报, 2013, 24(8): 1786-1803.
- [11] 朱明. 数据挖掘导论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2012.

(责任编辑 唐定国)