

雷达接收信号循环平稳特性控制研究

王永利

(中国人民解放军 66350 部队 技术室, 河北 保定 071000)

摘要: 由于幅度调制信号循环频率是载频处循环频率的两倍, 采用传统方法存在时延问题, 导致控制能力较差, 提出了雷达接收信号循环平稳特性控制技术; 根据雷达信号接收原理, 构建非线性规划数学模型, 即获取总时延; 根据总时延设立约束条件, 保证每一个相位和饱和度都具有独立属性, 方便频率调整; 利用遗传算法保证幅度信号循环频率与载频处循环频率大小一致, 改善时延问题; 由实验结果可知, 该方法最大控制强度可达到 99%, 能够有效控制信号的循环平稳特性。

关键词: 雷达; 接收信号; 循环平稳; 遗传算法; 非线性; 相位; 饱和度

Research on Cyclostationary Characteristic Control of Radar Receiving Signal

Wang Yongli

(Technical Office of Brigade 66350, PLA, Baoding 071000, China)

Abstract: Because the cycle frequency of amplitude modulation signal is two times the cyclic frequency of carrier frequency, the traditional method has time delay problem, which leads to poor control ability, and puts forward the cyclostationary characteristic control technology of radar receiving signal. According to the principle of radar signal reception, a mathematical model of nonlinear programming is constructed, that is to obtain the total time delay. The constraint conditions are set up according to the total time delay to ensure that each phase and saturation have independent properties, and the frequency adjustment is convenient. The genetic algorithm is used to ensure that the amplitude signal cycle frequency is consistent with the frequency of the carrier frequency, and the delay problem is improved. The experimental results show that the maximum control strength of the method can reach 99%, and it can effectively control the cyclostationary characteristics of the signal.

Keywords: radar; receiving signal; cyclostationary; genetic algorithm; nonlinearity; phase; saturation

0 引言

雷达接收到的信号并不只是一个辐射源发射的, 而是由多个独立的辐射源发射相关信号, 所有信号被雷达接收后组成混合信号, 因此, 在实际应用环境中, 混合信号保持循环平稳特性是一个值得研究的问题^[1]。在被动雷达接收到的混合信号中, 独立的混合信号循环谱密度函数等于各个信号自身循环谱密度函数叠加之和; 在主动雷达接收到的混合信号中, 对两个相干信号同时入射的情况加以分析^[2]。传统采用信号参数估计控制方法, 利用特定循环频率处的谱相关函数实现对雷达接收信号循环平稳特性控制研究, 由于幅度调制信号循环频率是载频处循环频率的两倍、编码信号循环频率与信号码速率谱相关函数一致, 导致雷达接收到的混合信号出现时延; 当参数满足一定条件时, 混合信号循环相关函数在循环频率处不再具有明显的非零属性, 造成信号循环平稳特性无法得到有效控制。因此, 采用遗传算法对雷达接收信号循环平稳特性控制展开研究。

1 雷达信号接收原理

天线、接收机、和信号处理器组成雷达, 发射机的主要任务是对外发射信号, 来自不同辐射源又反射后的回波信号由雷达接收机接收, 再经过信号处理器进行信号处理, 这是一套大致的步骤。磁波源是由各种通信信号组成, 主要是通过上述设备反射回来的。这主要由于雷达无法发射主动性质的电磁波。实现目标探测^[3], 雷达信号接收原理如图 1 所示。

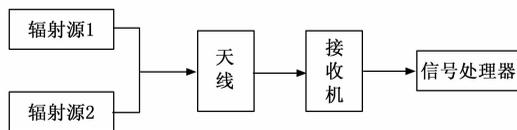


图 1 雷达信号接收原理图

辐射源发送的信号是具有独立性的, 彼此之间并无关联, 如果雷达同时接收多个由辐射源发射的信号, 那么将这些信号统称为混合信号, 该信号分量是相干的。

2 混合雷达信号循环平稳特性控制分析

根据上述雷达信号接收原理, 对混合信号循环平稳特性控制展开分析。针对混合信号的接收方式有两种, 分别是被动雷达接收和主动雷达接收。其中, 被动雷达可接收

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-05-07。

作者简介: 王永利(1975-), 男, 河北易县人, 工程师, 主要从事电气工程及自动化控制方向的研究。

来自不同辐射源发射的独立信号, 主动雷达可接收来自不同设备发射的电磁波信号^[4]。在独立信号接收过程中, 采用感应控制方式, 可实现对信号循环平稳特性的控制; 而在不同设备发射的电磁波信号接收过程中, 会出现时延问题, 为了解决该问题, 提出了遗传算法对雷达接收信号循环平稳特性进行控制。

2.1 构建非线性规划数学模型

以实时采集到的雷达接收信号数据为基础, 以主动雷达混合信号延误时间为目标, 构建非线性规划模型^[5]。采用 Webster 延误方法, 计算每次接收到的混合信号平均延误:

$$S = \frac{z(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda c)} + \frac{c^2}{2p(1-c)} \quad (1)$$

公式(1)中: z 为混合信号发射与接收的周期时长; λ 为某相位有效接收信号时长与周期时长的比值; c 为信号饱和度; p 为信号流量; $\frac{z(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda c)}$ 表示混合信号接收率为常数的时延; $\frac{c^2}{2p(1-c)}$ 表示在不同周期内, 混合信号接收率不一致产生的时延。

根据上述内容构建非线性规划数学模型, 即为总的延误时间:

$$W = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \left\{ \left[\frac{z(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i c_{ij})} + \frac{c_{ij}^2}{2p_{ij}(1-c_{ij})} \right] p_{ij} \right\} \quad (2)$$

公式(2)中: p_{ij} 为第 i 个相位的第 j 接收器处的信号流量; c_{ij} 为第 i 个相位的第 j 接收器处的信号饱和度; λ_i 为第 i 个相位的有效接收信号时长与周期时长的比值。

2.2 约束条件设立

根据构建的非线性规划数学模型, 设定约束条件:

1) 充分考虑通过接收器时的信号接收安全需求, 将每个相位的最短接收时间设置为大于等于某值 e , 因此, 每一个相位配时需满足:

$$e \leq t_i \leq z - T - 10 \times 3, i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

公式(3)中, t_i 为第 i 个相位的有效接收信号时长; T 为总延时耗费的时长。

2) 充分考虑饱和度限值约束条件, 将某个时间段内的周期在合理信号配时条件下, 各个相位的饱和度都不大于 1.0, 避免造成某个接收器接口处出现信号拥堵的现象。假定各个接收器接收端口饱和度都不大于 0.9, 那么饱和度约束条件为:

$$c = \frac{p}{N} = \frac{p}{s} \frac{g_e}{z} \leq 0.9 \quad (4)$$

公式(4)中: p 为实际信号流通量; N 为信号通行能力; s 为饱和流量; g_e 为有效接收信号时长。

2.3 采用遗传算法控制信号时延

遗传算法是一种通过模拟自然进化过程搜索的最优控制时延方法。每个个体实际上是染色体带有特征的实际信号^[6]。染色体作为遗传物质的主要载体, 其内部表现出来的是某个信号的成分, 它决定了信号频率大小, 因此, 在

一开始需要实现从信号频率变量到控制信号大小的映射, 也就是编码工作。由于仿照信号编码的工作很复杂, 往往进行简化, 初代种群产生之后, 按照适者生存和优胜劣汰的原理, 逐代演化产生出越来越好的近似解, 在每一代, 根据问题域中个体的适应度大小选择个体, 并借助于自然遗传学的遗传算子进行组合交叉和变异, 产生出代表新的解集种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后代种群比前代更加适应环境, 末代种群中的最优个体经过解码, 可以作为最优解来实现信号时延的有效控制^[7-9]。

2.3.1 变量编码

利用实数对变量进行编码, 编码的长度即为变量的个数。在雷达接收装置中, 对一个 4 相位接收端口, 设 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为变量, 其中 a_1 、 a_2 、 a_3 分别为第 1、2、3 相位的有效接收信号时长, 在固有的损失时间基础上, 第 4 相位的有效接收信号时长可表示为: $a_4 = T - a_1 - a_2 - a_3$, 那么编码可表示为: a_1 、 a_2 、 a_3 。

2.3.2 遗传操作

(1) 选择操作。

保留 2 个进化与当代为止最优的信号, 采用双亲与后代竞争方式, 利用轮盘选择算子, 将所有待选择的信号按照适应程度由高频到低频排序, 第 i 个信号个体生存概率为:

$$P(i) = F(1-F)^{i-1} \quad (5)$$

公式(5)中: F 为选择压力。

在每个信号生存概率求出后, 可计算个体选择概率, 按照轮盘赌博方式进行选择, 进而产生后代。

(2) 交叉。

交叉概率对种群中所有信号进行随机配对, 如果信号数量为奇数, 那么可随机去掉一个信号个体^[10]。每一个在 $[0, 1]$ 范围内的配对信号都会产生一个随机数 r , 如果 r 小于交叉概率, 那么配对的信号需要进行交叉操作, 交叉规则如下所示:

$$\begin{aligned} P'_1 &= zP_1 + (1-z)P_2 \\ P'_2 &= (1-z)P_1 + zP_2 \end{aligned} \quad (6)$$

由公式(6)可知: P_1 、 P_2 分别为进化与当代为止最优信号保留概率; 分别为两个新个体产生的概率。根据上述饱和度约束条件, $c = \frac{p}{N} \leq 0.9$, 在饱和度约束范围内生成的群体, 经过交叉操作后可生成子个体。

(3) 变异。

变异概率对种群中任何一个信号个体, 在 $[0, 1]$ 范围内的配对信号都会产生一个随机数 r , 如果 r 小于变异概率, 那么配对的信号需要进行变异操作^[11]。如果生成的个体为非正常个体, 那么需要重新配对, 直到获取合法个体为止。采用遗传算法对雷达接收信号循环平稳特性控制过程, 具体描述如下所示:

1) 将雷达接收的混合信号进行初始化处理, 设定信号种群数目、染色体长度、迭代总数、交叉概率和变异概率,

根据上述编码结果,可获取变量个数,即为: a_1 、 a_2 、 a_3 ;

2) 采用实数对变量进行编码机制,在混合信号接收率为常数时延情况下,即 $\frac{z(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda c)}$ 计算结果,选择随机产生的种群数目;在不同周期内,混合信号接收率不一致产生时延情况下,即 $\frac{c^2}{2p(1-c)}$ 计算结果,选择随机产生的种群数目。将上述两种结果相加,也就是混合信号平均延误 S 的计算结果,该结果下产生的种群数目为最终种群数目大小的染色体。

3) 以该染色体数目计算个体函数适应值;

4) 将父—子代产生的所有信号个体进行重新排列,构造出具有秩序的新种群。

5) 按照交叉概率对上述随机产生的信号个体进行交叉处理;

6) 按照变异概率对上述随机产生的信号个体进行变异处理;

7) 验证调整幅度信号循环频率与载频处循环频率是否保持一致,如果没有,则需转到步骤(3),重新计算个体函数适应值;如果保持一致,则需输出最佳信号配时方案。

在控制研究过程中,构建非线性规划数学模型,根据每次接收到的混合信号平均延误时间计算总的延误时间。设立约束条件,根据总的延误时间,调整幅度信号循环频率与载频处循环频率保持一致,实现信号循环平稳特性的有效控制,并改善了主动雷达接收信号出现的时延问题。

3 实验结果与分析

为了验证采用遗传算法雷达接收信号循环平稳特性控制研究的合理性,需将实验分成被动雷达信号与主动雷达信号的循环平稳控制两部分进行,并对实验控制效率结果总结。实验的方法步骤主要分为:

1) 分别采用改进控制方法和传统控制方法对被动雷达接收信号循环谱密度函数包络情况进行测试,得到实验对比结果如图 2 所示;

2) 分别采用改进控制方法和传统控制方法对主动雷达接收信号循环谱密度函数包络情况进行测试,得到实验对比结果如图 3 所示;

具体实验过程描述,以及实验结果分析如下:

3.1 被动雷达信号

被动雷达信号依靠第三方辐射源对目标发射电磁波,接收回波信号,获取目标信息。以相互独立的等功率信号对控制研究结果进行验证,设雷达接收信号载频为 1000 Hz,带宽为 20%,码率为 500 Hz。将传统控制方法与采用遗传算法的控制方法信号循环谱密度函数包络情况进行对比,结果如图 2 所示。

由图 2 可知:传统控制方法循环谱密度所呈现的线型为直线,虽有包络凸起,但是基本与原始包络为“一线”状态,最高循环谱密度达到 3.5×10^{-5} 左右,而采用遗传算法循环谱密度所呈现的线型为曲线,凸起的包络呈分散状

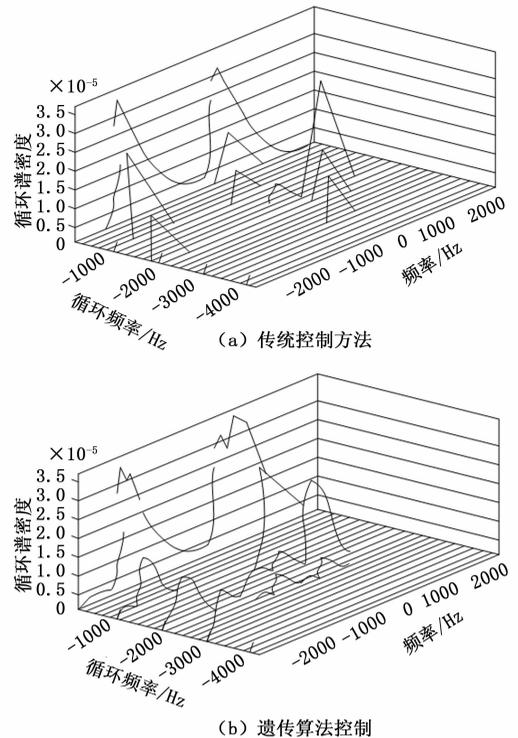


图 2 两种控制方法被动信号循环谱密度函数包络情况

态。从对比结果来看,采用遗传算法有限采样限制了信号接收强度,促使控制信号循环谱密度偏差较小。

根据两种控制方法的信号循环谱密度函数包络情况,将传统方法与遗传算法对控制程度展开对比分析,结果如表 1 所示。

表 1 两种方法在被动雷达信号下的控制程度对比

循环谱密度 ($\times 10^{-5}$)	传统方法控制 程度	遗传算法控制 程度
0.5	95%	95%
1.0	89%	92%
1.5	83%	90%
2.0	78%	88%
2.5	70%	88%
3.0	65%	87%
3.5	60%	87%

由表 1 可知:当循环密度为 0.5×10^{-5} 时,采用传统方法控制程度达到 95%,同样采用遗传算法控制程度也可达到 95%,随着循环密度的变大,采用传统方法控制程度逐渐下降,而遗传算法控制程度也有小幅度下降趋势。当循环密度为 3.5×10^{-5} 时,采用传统方法控制程度下降到 60%,而遗传算法控制程度下降到 87%。由此可知,当循环密度达到最大时,两种对循环平稳特性的控制程度相差 27%,在被动雷达信号状态下,采用遗传算法控制能力较强。

3.2 主动雷达信号

主动雷达依靠自身定向辐射电磁波,接收目标反射回波进行探测,获取目标的方位、距离等信息,还可以通过

回波中的多普勒频移, 计算出目标径向速度等信息。主动雷达接收信号载波频率可达到 1000 Hz、相对带宽为 20%, 使用相同功率信号时, 会出现时延。当信号在循环频率为 2000 Hz 时, 将传统控制方法与遗传算法控制的信号循环谱密度函数包络情况进行对比, 结果如图 3 所示。

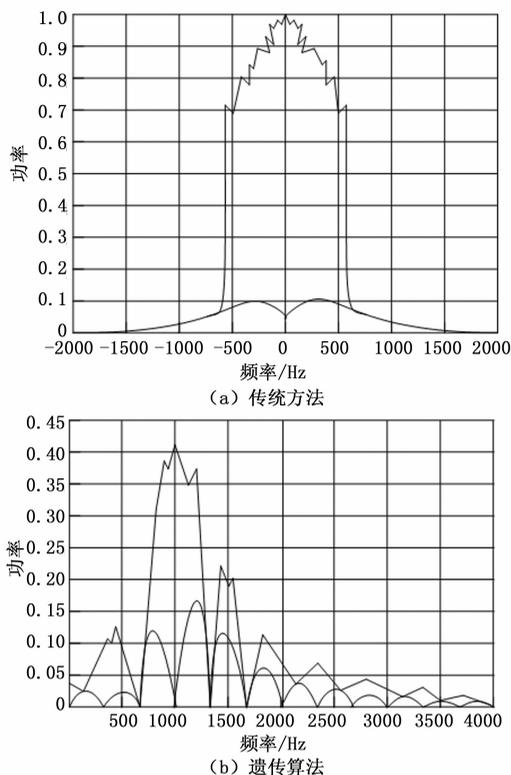


图 3 两种控制方法主动信号循环谱密度函数包络情况

由图 3 可知: 采用传统方法具有明显失真现象, 在频率为 0 Hz 处功率达到最大, 但是无论频率增或减, 功率都会大大降低, 且呈对称性; 而采用遗传算法在频率为 1000 Hz 时, 具有明显非零循环函数调动现象, 有可能会出幅度降低, 但是由于信号时延, 促使信号与信号之间的传递也出现时延, 此时将两个循环频率处的频谱密度函数信息结合加以利用, 可有效改善控制的平稳性。

将传统方法与遗传算法对控制程度在相同信号频率下展开对比分析, 结果如表 2 所示。

表 2 两种方法在主动雷达信号下的控制程度对比

频率/Hz	传统方法控制程度	遗传算法控制程度
0	96%	99%
500	89%	92%
1000	60%	90%
1500	50%	88%
2000	45%	88%

由表 2 可知: 当频率为 0 Hz 时, 采用传统方法与遗传算法控制程度都可达到 95% 以上, 但是信号频率一旦增强, 两种方法控制程度都有所下降。当频率为 2000 Hz 时, 传

统方法控制程度下降到 45%, 而遗传算法控制程度仍然较高, 为 88%, 两者相差 43%。由此可知, 在主动雷达信号状态下, 采用遗传算法控制能力较强。

3.3 实验结论

根据上述实验内容, 可得出实验结论:

1) 传统控制方法循环谱密度所呈现的线型为直线, 而遗传算法循环谱密度所呈现的线型为曲线, 当循环密度为 0.5×10^{-5} 时, 两种方法控制程度达到了最佳状态, 但是随着循环密度变大, 两种方法控制程度出现了较大差距, 遗传算法控制程度比传统方法控制程度高出 27%, 由此可知, 在被动雷达信号状态下, 采用遗传算法控制能力较强。

2) 当频率为 0 Hz 时, 两种方法控制程度都可达到 99%; 当频率为 2000 Hz 时, 两种方法控制程度相差最大, 且遗传算法控制达到平稳状态, 不再下降, 由此可知, 在主动雷达信号状态下, 采用遗传算法控制能力较强。

无论是在被动雷达信号状态下, 还是主动雷达信号状态下, 采用遗传算法控制能力都比传统方法控制能力强。

4 结论与成果

在实际雷达接收信号循环平稳特性控制过程中, 实时采集信号流的相关数据, 发送至信号处理器中进行相关步骤的处理, 采用遗传算法调整幅度信号循环频率与载频处循环频率, 保持两者频率大小一致, 实现信号循环平稳特性的有效控制。为了确保控制结果的合理性, 充分考虑接收器的接收端口饱和限值, 以各个相位进出口总延时作为目标展开研究, 该研究方式不仅使被动雷达信号接收的循环平稳特性得到了有效控制, 还改善了主动雷达信号接收出现的时延问题。该项目的研究体现了理论与实际的结合, 并通过实验得到了证明。但是, 在进行实验过程中, 由于时间存在差异, 导致结果的比较也只是定性评价, 如果想要定量评价, 还需模拟真实环境, 降低结果产生的误差。

参考文献:

- [1] 李杰, 赵毅强, 叶茂, 等. 机载激光测深雷达中大动态范围信号的多通道处理技术 [J]. 光子学报, 2018, 23 (3): 41-51.
- [2] 张建军. 基于 MHT 的网络化雷达抗干扰算法 [J]. 计算机工程与设计, 2015, 36 (2): 415-418.
- [3] 谢前朋, 王伦文. 基于连续稀疏恢复循环平稳信号的 DOA 估计 [J]. 现代雷达, 2017, 39 (1): 32-36.
- [4] 黄波, 潘爽, 李雪. 基于四阶循环平稳的 STBC-OFDM 信号盲识别 [J]. 信号处理, 2017, 33 (9): 1221-1229.
- [5] 陈刚, 王俊, 王珏, 等. 外辐射源雷达参考信号提纯方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2018, 25 (1): 45-49.
- [6] 朱行涛, 刘郁林, 栗铁桩. 基于循环平稳差异的直扩信号盲提取抗干扰方法 [J]. 电子学报, 2017, 45 (6): 1506-1512.

[7] 谌诗娃, 周青松, 张剑云, 等. 对空时自适应处理雷达的投散射式伪杂波干扰方法信号特性分析 [J]. 电子学报, 2017, 20 (18): 11-18.

[8] 刘 垒, 张 玉, 李 丞. 基于高阶累积量的二次雷达应答信号特征分析 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (10): 25-29.

[9] 胡中泽, 曹 菲, 乔术旗, 等. 雷达抗干扰性能的评估模型研究 [J]. 电子设计工程, 2017, 20 (24): 134-136.

[10] 蒋立新. 船舶接收雷达信号回波数据压缩算法研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 31 (20): 15-19.

[11] 王 杰, 董 昕, 侯仁波. 一种用于雷达信号调制分类的特征评估方法 [J]. 电讯技术, 2017, 57 (5): 528-534.

(上接第 47 页)

由图 7 不难看出, GA-LM-BP 神经网络在非线性函数的拟合上比 BP 神经网络的能力更强, 预测误差明显减少, 精度提高。

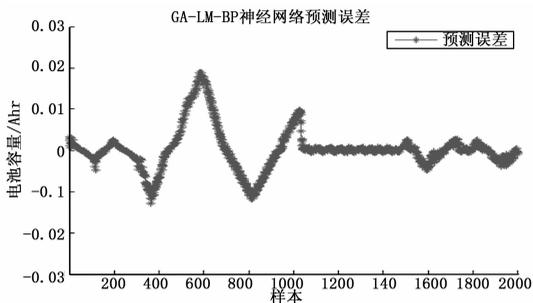


图 8 GA-LM-BP 神经网络的输出预测误差

由图 8 不难看出, GA-LM-BP 神经网络的输出预测效果更好, 预测误差最高是 0.019 5, 平均误差是 0.004 5。通过对比 BP 神经网络和 GA-LM-BP 神经网络的预测输出效果, 使用了 GA 优化了初始权值和阈值后在预测结果方面更准确, 稳定性提高, 预测误差显著提高而且全局收敛性好, 达到了比较理想的结果。

4 小结

利用 LM 算法融合高斯-牛顿法和梯度下降法优点的快速性, 并充分利用遗传算法全局随机搜索强的优势, 构建了三层 5-6-1 型的 GA-LM-BP 神经网络结构, 优化 BP 神经网络的初始权值和阈值, 减少了 BP 神经网络陷入局部极小值的几率。对锂离子电池数据进行了实验表明, GA-LM-BP 神经网络 GA-LM-BP 神经网络预测结果方面更准确, 稳定性提高, 预测误差显著提高而且全局收敛性好, 实验结果验证了该方法预测的有效性。

参考文献:

[1] 王丽梅. 磷酸铁锂电池组安全保护技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015.

[2] Goebel K, Saha B, Saxena A, et al. Prognostics in Battery Health Management [J]. IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, 2008, 11: 33-40.

[3] Saha, Bhaskar, Goebel, Kai, Christophersen, Jon. Comparison of prognostic algorithms for estimating remaining useful life of batteries [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2009, 31 (3), 293-308.

[4] 豆金昌. 锂离子电池健康评估及剩余使用寿命预测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

[5] Dong Hancheng, Jin Xiaoning, Lou Yangbing, et al. Lithium-Ion Battery State of Health Monitoring and Remaining Useful Life Prediction Based on Support Vector Regression-Particle Filter [J]. Journal of Power Sources, 2014, 14 (1): 114-123.

[6] 张卓然. 锂离子电池建模与故障预测研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

[7] Tang L, Decastro J, Kacprzynski G. Filtering and prediction techniques for model-based prognosis and uncertainty management [A]. Prognostic and System Health Management Conference [C]. IEEE, 2010.

[8] Li Junfu, Wang Lixin, Zhang Liqiang, et al. Remaining Capacity Estimation of Li-Ion Batteries Based on Temperature Sample Entropy and Particle Filter [J]. Journal of Power Sources, 2014, 268 (1): 895-903.

[9] Bhaskar Saha, Kai Goebel, Scott Poll, Jon Christophersen. Prognostics Methods for Battery Health Monitoring Using a Bayesian Framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 (2): 291-296.

[10] Dalal, J Ma, D He. Lithium-ion battery life prognostic health management system using particle filtering framework Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O [J]. Journal of Risk and Reliability, 2011, 225 (1): 81-90.

[11] 周建宝, 王少军, 马丽萍, 等. 可重构卫星锂离子电池剩余寿命系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34 (9): 2034-2044.

[12] 李欣然, 卢龙辉, 吕超贤, 等. 粒子滤波在锂离子电池剩余寿命预测中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26 (8): 1733-1740.

[13] 苗 强, 崔恒娟, 谢 磊, 等. 粒子滤波在锂离子电池剩余寿命预测中的应用 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36 (8): 47-52.

[14] 张 金, 魏 影, 韩裕生, 等. 一种改进的锂离子电池剩余寿命预测算法 [J]. 电子技术应用, 2017, 41 (8): 110-112.

[15] 朱亮标. 基于数据驱动的锂离子电池剩余寿命预测模型及软件实现 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

[16] 董汉成. 卫星电源电池健康状态诊断方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.