

# 直升机模型旋翼声学试验声信号 分析中的抑噪方法研究

王凯, 吴志刚, 秦强, 邓细凤

(中航工业直升机设计研究所, 江西景德镇 333001)

**摘要:** 将直升机模型旋翼在消声室中进行声学性能测试是研究直升机旋翼噪声特性的一种最有效最直接的方式; 在直升机模型旋翼消声室试验中, 发现传声器采集到的围绕 170 Hz 特征频率分布的频带极窄的旋翼声信号上叠加有宽频无用噪声; 试验中采集到的声信号信噪比与总距角大小成正比, 小总距角时声信号信噪比较小, 无用信号成分会掩盖声信号真实信息, 必须采用高效的方法去除无用成分并同时最大可能不损坏需要成分; 模型旋翼声信号中各成分频带分布不同, 信号自相关长度与其分布频带有关, 文章指出可以根据信号中各成分之间自相关长度的差异性采用自适应线性预测器把所需信号成分预测分离出来; 通过分别对比在总距为 0°、6°、10° 时声信号与各自处理结果, 表明叠加在信号上的无用成分被成功滤除, 信号质量得到明显改善。

**关键词:** 旋翼; 声信号; 自相关长度; 自适应预测

## Study of an Approach of Noises Suppression in Acoustic Tests of a Helicopter Rotor Model

Wang Kai, Wu Zhigang, Qin Qiang, Deng Xifeng

(China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

**Abstract:** The acoustic performance test of a helicopter rotor model is one of the most effective and direct way to study the helicopter rotor noise features. In an acoustic test of a helicopter rotor model in the anechoic chamber, it is found that unwanted wideband noises have superimposed on the rotor acoustic signals which are distributed around the 170Hz characteristic frequency in an extremely narrow band. Since the signal to noise ratio (SNR) is proportional to the collective pitch, when the collective pitch is small, a low SNR will lead to real information of the signal be covered by the unwanted signal components. It is necessary to find a way to remove the unwanted components and to remain intact wanted components. Different components of the acquired acoustic signal have different frequency band distributions, and the signal autocorrelation length relies on its frequency band distribution, so in this paper, it points out that the required signal components can be separated using the adaptive linear predictor according to the differences of the autocorrelation length of the components of the signals. The results of the processing of the acquired signals when the collective pitch are 0°, 6°, 10° respectively show that noises are filtered successfully and the signals are improved significantly.

**Keywords:** helicopter rotor; acoustic signals; autocorrelation length; adaptive linear predictor

## 0 引言

作为具有空中悬停、垂直起降、低空飞行等优势飞行器, 直升机在民用和军用方面都受到极大的重视。直升机旋翼系统性能对直升机的飞行品质和飞行性能有着决定性的影响, 是直升机获得升力、实现悬停、垂直起降等飞行方式的主要系统。但是, 旋翼也是直升机的主要振源之一, 是直升机噪声产生的重要来源。噪声大是直升机的一个主要缺点, 不仅会对周边环境产生严重的噪声污染, 而且机舱内的强噪声也极大的影响着乘坐的舒适性, 这些都限制着直升机在民用航空领域的发展应用。在军用方面, 直升机隐身能力降低的一个最重要的因素是其较强的外部辐射噪声。因此, 直升机噪声现已成为直升机技术领域的一个重要研究对象<sup>[1-3]</sup>。要降低直升机噪声有必要对直升机旋翼声学性能进行研究<sup>[3-5]</sup>, 旋翼系统声学性能的提升将推动直升机应用的进一步发展。

探索直升机旋翼系统声学性能的一个有效途径是对旋翼声信号进行研究。现行旋翼噪声试验研究包括户外飞行噪声试验、风洞前飞噪声试验以及消声室旋翼模型悬停噪声试验 3 种<sup>[6-7]</sup>。在试验过程中采集到的声信号同时混有宽带背景噪声以及其它机械振动噪声。旋翼旋转声信号分布的频带与噪声频带重叠, 但旋翼旋转声信号与噪声成分不相关, 信号自相关长度不同, 因此可以根据信号中不同带宽信号的自相关长度之间的差异, 采用自适应线性预测器来对信号中的噪声进行抑制。本文采用该方法, 将采集到的声信号中叠加的噪声成分成功滤除, 声信号质量得到明显改善。

## 1 噪声试验中旋翼声信号特征

为了确定低噪声旋翼初步气动布局, 为低噪声直升机理论研究提供数据支持, 可以在旋翼噪声试验室开展模型旋翼的噪声特性试验。为了对比研究桨尖下反旋翼的降噪效果, 在旋翼噪声试验室开展了 2 m 直径的抛物线后掠桨尖、抛物线后掠带 20° 下反桨尖及抛物线后掠带 45° 下反桨尖三副模型旋翼的悬停状态噪声特性试验。

试验时, 传声器加装风球和鼻锥, 在桨盘平面内指向桨毂

收稿日期: 2015-10-27; 修回日期: 2015-11-23。

作者简介: 王凯 (1989-), 男, 江西高安人, 研究生, 助理工程师, 主要从事直升机综合试验方向的研究。

中心方向安装。试验中旋翼转速为额定转速 2 064 r/min、80%额定转速与 95%额定转速；横向与纵向周期变距均为 0°；总距角变化范围为 0°~10°，步长 1°。在 2 m 直径抛物线后掠桨尖模型试验中，在桨毂加装 5 片桨叶后，额定转速下，总距角为 0°和 6°时，距离旋翼轴 4 m 的传声器采集到的旋翼声信号时域波形分别如图 1 和图 2 所示，其信号功率谱密度分别如图 3 与图 4 所示。从图 1 与图 2 观察可以看出，旋翼声信号具有较强的周期性，其周期大约为 0.006 s；而图 3 与图 4 中峰值也分别出现在 170.3 Hz 与 173.4 Hz，与时域波形中周期一致，与试验条件相吻合，采集信号正确。从信号时域波形可以看出，周期性信号上叠加了许多噪声成分。对比图 1 与图 2 可以看出，在总局角增大后，信号的周期性更清晰，说明在功率增大后有用信号得到增强，与实际情况相符。

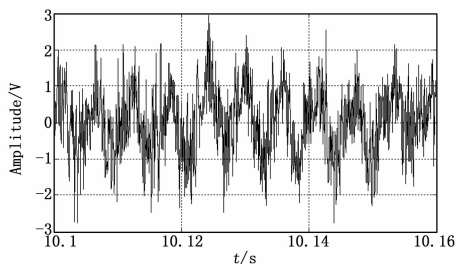


图 1 总距为 0°时声信号时域波形

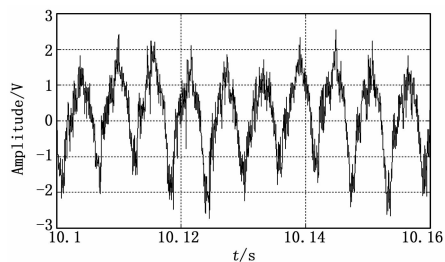


图 2 总距为 6°时声信号时域波形

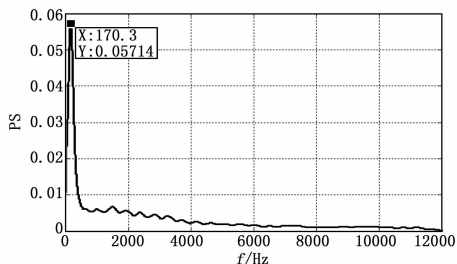


图 3 总距为 0°时声信号功率谱密度

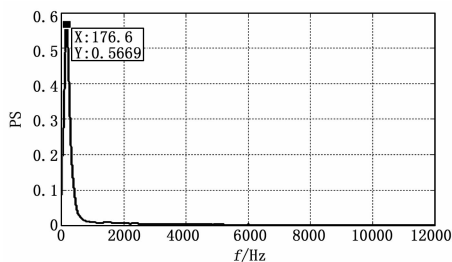


图 4 总距为 6°时声信号功率谱密度

由信号功率谱分析可知，有用声信号分布在 170 Hz 左右的低频区域。采集到的声信号中同时混有全频域分布的宽带噪声信号，并且在低频区域分布的噪声信号强度较强，在 0°总距时低频噪声强度与有用声信号强度在一个数量级，在极端情况时有可能掩盖信号有效成分。为了便于对桨叶噪声特性进行分析有必要将声信号中的噪声成分滤除。由于声信号有效成分分布在 170 Hz 左右的一个极窄的频带内，在信号有效成分频带旁还分布有较强的低频噪声，采用常规高低通滤波方法很难在滤除噪声的同时又保留完整有用信号成分。然而，传声器采集到的噪声信号的产生过程与桨叶旋转声信号的产生过程之间可以认为是独立的，信号不相关。信号的自相关长度与其分布频带的倒数有关，两者的自相关长度相差明显。因此可以根据信号中不同带宽噪声的自相关长度之间的差异，采用适应线性预测器来对信号中的噪声进行抑制，下文将对该噪声抑制原理进行阐述。

## 2 旋翼声信号分离方法

### 2.1 自适应滤波

自适应线性预测器的核心是自适应滤波器。自适应滤波器由两部分组成，分别是自适应算法和自适应处理器。自适应处理器又称为参数可调数字滤波器。参数可调的数字滤波器一般分为 FIR 型数字滤波器、IIR 型数字滤波器或格型数字滤波器。本文所介绍的信号处理方法中将使用 FIR 型滤波器，其原理如图 5 所示。

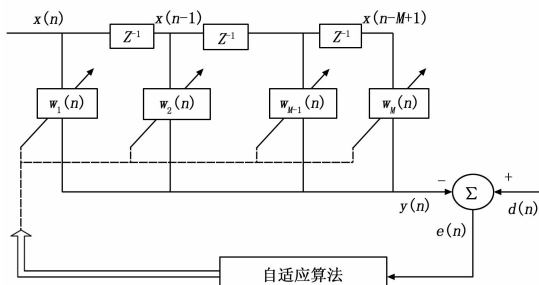


图 5 自适应滤波器原理图

其中，时刻  $n$  输入  $M$  阶滤波器的信号矢量为：

$$X(n) = [x(n)x(n-1)\cdots x(n-M+1)]^T \quad (1)$$

时刻  $n$  滤波器加权矢量（即滤波器参数矢量）为：

$$W(n) = [w_1(n) \quad w_2(n) \quad \cdots \quad w_M(n)]^T \quad (2)$$

时刻  $n$  滤波器输出为：

$$y(n) = \sum_{i=1}^M w_i(n)x(n-i+1) = W^T(n)X(n) = X^T(n)W(n) \quad (3)$$

时刻  $n$  滤波器输出  $y(n)$  与其期望输出  $d(n)$  之间的误差为：

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - W^T(n)X(n) \quad (4)$$

自适应滤波的基本思想是寻找最优滤波器权系数使输入信号通过滤波器后均方误差性能函数：

$$V(W) = \xi(n) = E[e^2(n)] \quad (5)$$

的值达到最小。当滤波器的权系数收敛时，输出信号  $y(n)$  可近似认为是参考信号  $d(n)$  的一个等效。

根据公式 (1) ~ (5) 可知，在时刻  $n$  的均方误差是滤波器权系数矢量的二次函数，其表达式为：

$$\xi(n) = E[e^2(n)] = E[(d(n) - W^T(n)X(n))^2] = E[d^2(n) - W^T(n)d(n)X(n) - d(n)X^T(n)W(n) + W^T(n)X(n)X^T(n)W(n)] \quad (6)$$

化简后其表达式如下:

$$\xi(n) = E[d^2(n)] - 2P^T(n)W(n) + W^T(n)R_x W(n) \quad (7)$$

其中:  $E[d^2(n)]$  是期望响应  $d(n)$  的方差,  $P = E[d(n)X(n)]$  是输入矢量  $X(n)$  和期望响应  $d(n)$  的互相关矢量,  $R_x = E[X(n)X^T(n)]$  是输入信号矢量  $X(n)$  的自相关矩阵, 具体表达式如下

$$R_x = \begin{bmatrix} E[x^2(n)] & E[x(n)x(n-1)] & \cdots \\ E[x(n-1)x(n)] & E[x^2(n-1)] & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E[x(n-M+1)x(n)] & E[x(n-M+1)x(n-1)] & \cdots \\ & E[x(n)x(n-M+1)] & \\ & E[x(n-1)x(n-M+1)] & \\ & \vdots & \\ & E[x^2(n-M+1)] & \end{bmatrix} \quad (8)$$

自适应横向滤波器采用最小均方误差准则, 当  $E[e(n)X(n)] = 0$  时, 可以得到滤波器最优权系数矢量  $W_{opt}$ , 并且满足正则方程 (9):

$$R_x W_{opt} = P \quad (9)$$

$$W(n+1) = W(n) + \mu X(n)e(n) \quad (10)$$

自适应滤波器采用最速梯度法来求解最优滤波器的权系数, 权系数按照下式 (10) 进行迭代, 收敛后获得权系数矢量即为最优权系数矢量。

自适应滤波器在通信、控制、语音分析和综合、地震信号处理、雷达和声呐波束形成以及医学诊断等诸多科学领域有着广泛的应用, 例如仅根据信号的一些先验知识从采集信号中预测分离需要的信号成分, 其原理如下文所述。

### 2.2 信号自适应预测原理

自适应线性预测器以信号  $\alpha(n)$  经过一定时延  $\Delta(\Delta \neq 0)$  后的信号  $\alpha(n-\Delta)$  作为输入信号, 把未经时延的信号  $\alpha(n)$  作为参考信号。 $\alpha(n-\Delta)$  通过横向滤波器的处理后得到输出信号  $y(n)$ , 滤波器输出  $y(n)$  与参考信号  $\alpha(n)$  的差值作为误差信号  $e(n) = \alpha(n) - y(n)$ 。其中, 误差信号  $e(n)$  是检测信号通过自适应线性预测器后要得到的输出信号。自适应线性预测器原理如图 6, 此时横向滤波器的输出  $y(n)$  是需要得到的输出信号。

把参考信号  $\alpha(n)$  分为两个信号分量  $\alpha_1(n)$  和  $\alpha_2(n)$ , 即

$$\alpha(n) = \alpha_1(n) + \alpha_2(n) \quad (11)$$

对这两个分量有以下两个基本假设:

- 1)  $\alpha_1(n)$  和  $\alpha_2(n)$  互不相关;
- 2)  $\alpha_1(n)$  与  $\alpha_2(n)$  的自相关函数具有这些特性:  $m \geq M_1$  时,  $R_{\alpha_1\alpha_1}(m) \approx 0$ ;  $m \geq M_2$  时,  $R_{\alpha_2\alpha_2}(m) \approx 0$ ; 其中  $M_1$  和  $M_2$  是常数,  $m$  是时间变量。

选取时延长度  $\Delta$  满足  $M_2 < \Delta < M_1$  时, 对所有  $|m| > \Delta$ , 自相关函数  $R_{\alpha_2\alpha_2}(m) \approx 0$ , 而自相关  $R_{\alpha_1\alpha_1}(m)$  仍存在非零项。参考信号  $\alpha(n)$  与滤波器输入  $\alpha(n-\Delta)$  的互相关函数为:

$$R_{\alpha(n)\alpha(n-\Delta)} = E\{(\alpha_1(n) + \alpha_2(n))(\alpha_1(n-\Delta) + \alpha_2(n-\Delta))\} = E\{\alpha_1(n)\alpha_1(n-\Delta)\} + E\{\alpha_1(n)\alpha_2(n-\Delta)\} + E\{\alpha_2(n)\alpha_1(n-\Delta)\} + E\{\alpha_2(n)\alpha_2(n-\Delta)\} \quad (12)$$

根据上述基本假设有

$$R_{\alpha(n)\alpha(n-\Delta)} = E\{\alpha_1(n)\alpha_1(n-\Delta)\} + E\{\alpha_2(n)\alpha_1(n-\Delta)\} = E\{(\alpha_1(n) + \alpha_2(n))\alpha_1(n-\Delta)\} = R_{\alpha(n)\alpha_1(n-\Delta)} \quad (13)$$

此式说明当  $M_2 < \Delta < M_1$  时,  $\alpha(n-\Delta)$  与  $\alpha_1(n)$  相关, 而与  $\alpha_2(n)$  不相关, 通过  $\alpha(n-\Delta)$  可以预测  $\alpha_1(n)$ 。

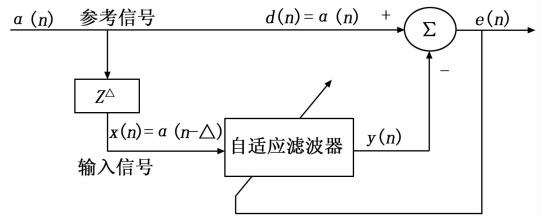


图 6 自适应线性预测器原理图

输入自适应预测器的检测信号模型为:

$$\alpha(n) = s(n) + \eta(n) \quad (14)$$

其中:  $\alpha(n)$  为采集到的检测信号;  $s(n)$  为要预测的旋翼声信号;  $\eta(n)$  为检测环境中的宽带噪声。信号自相关长度与其带宽成反比, 因此这两种信号成分的自相关长度满足  $l_\eta < l_s$ 。若要自适应滤波器的输出为  $s(n)$ , 则输入要与  $s(n)$  相关, 而与  $\eta(n)$  不相关, 因此选择时延  $\Delta$  使其满足  $l_\eta < \Delta < l_s$ , 滤波器的输出信号即为要得到的预测信号  $\hat{s}(n)$ 。下文将使用该方法对直升机旋翼噪声试验中采集到的声信号进行处理以验证该方法的真实效果。

### 3 旋翼声信号噪声抑制效果分析

在噪声干扰下, 从信号中获取信息有可能失真甚至错误, 尤其是在低信噪比时噪声把信号有效成分淹没的情况下, 如何提取所需信号成分一直是个难题。根据本文第 2 部分对传声器采集到的声信号时域频域特征分析, 噪声几乎遍布所有频率, 其自相关长度趋于 0, 要对信号中噪声进行抑制滤除, 自适应线性预测器时延参数应尽可能接近其自相关长度但不能为 0, 文中选择为 1 个采样间隔即  $\Delta = 1$ 。

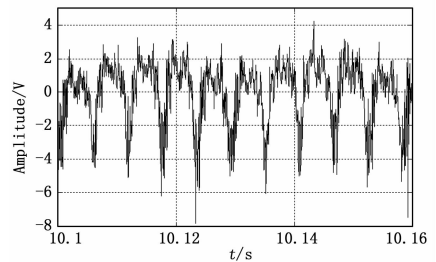


图 7 总距为 10° 时声信号时域波形

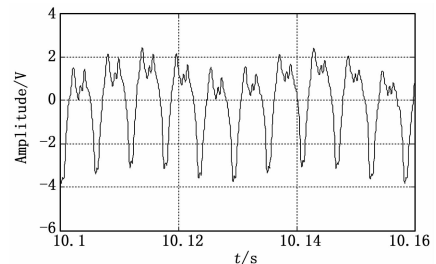


图 8 总距为 10° 抑噪后声信号时域波形

将额定转速下, 横向与纵向周期变距为 0°, 总距为 10° 时采集到的声信号输入自适应线性预测器, 输入输出信号的时域

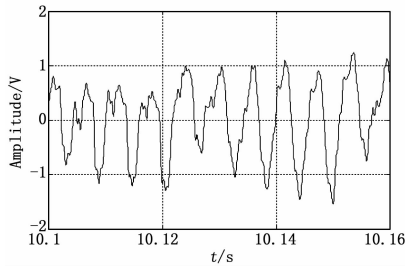


图 9 总距为 0°抑噪后声信号时域波形

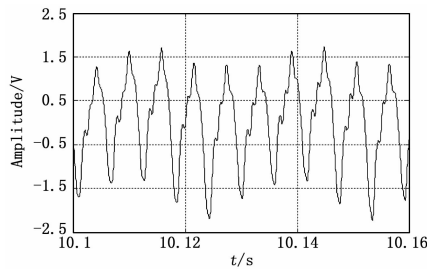


图 10 总距为 6°抑噪后声信号时域波形

波形分别如图 7 与图 8 所示。对比发现，从采集信号中分离出所需信号成分，原有叠加在信号上的噪声成分被成功滤除，并且有用信号成分没有失真。为了验证文中方法的可靠性，对额定转速下，横向与纵向周期变距为 0°，总距分别为 0°与 6°时采集到的声信号进行处理，处理后的输出信号时域波形分别如图 9 与图 10 所示。对比图 1 与图 9，图 3 与图 10 可以看到，即使在低信噪比情况，所需信号成分能够无失真地从采集信号中预测分离得到，本文所述噪声抑制方法效果优良。

基于信号相关长度差异的自适应预测抑噪方法相比于常规高低通滤波器，避免了针对信号特定带宽设计滤波器通频带的复杂过程，而只需要根据信号的一些先验知识改变预测器时延参数即可，具有实用价值，例如该方法同样可以用于振动信号的后期分析处理当中。

(上接第 236 页)

法。它的优点是其“分解”思想，在公式 (3) ~ (10) 所示的分解估计构架下，将 SLAM 问题分解为路径估计和地图估计两个问题。选用性能优异的卡尔曼滤波器来递推估计机器人的位姿，用 EKF 更新地图中观测到的特征。SLAM 问题的计算复杂度大大降低，实验表明了改进的 EKF—SLAM 具有更好的性能。

参考文献:

[1] 李仁厚. 自主移动机器人导论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.

[2] 陈卫东, 张 飞. 移动机器人的同步白定位与地图创建研究进展 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22 (3): 455-460.

[3] 西格沃特 R, 诺巴克什 I R. 自主移动机器人导论 [M]. 李仁厚. 西安: 西安交通大学出版社, 2006, 241-245.

[4] Montemerlo M, Thnm S, Koller D, et al. FastSLAM 2. 0: an improved particle filtering algorithm for simultaneous localization and mapping that provably converges [A]. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence [C]. California, CA, USA; UCAI, 2003, 1151-1156.

4 结论

在旋翼噪声室开展模型旋翼噪声特性试验中发现采集到的声信号中叠加有宽频噪声，信号重要成分分布频带较窄，低总距情况下，噪声干扰严重。为从声信号中获取准确可靠信息，需要将无用噪声滤除并不失真的保留所需成分，由于所需信号分布频带较窄，采用高低通滤波存在困难。本文根据信号中不同成分之间自相关长度的差异，采用自适应线性预测器对所需信号进行预测滤除无用信号。通过分别对 0°、6°、10°总距时采集信号进行处理，结果表明所需信号波形完整没有失真，同时噪声被干净滤除。该方法不需要针对信号设计相应同频带，而只需根据信号频率分布先验信息改变预测器时延参数，使用方便灵活，在常见的振动信号的分析处理当中也同样适用。

参考文献:

[1] Cyril P, Joelle Z, Olivier R, et al, Helicopter rotor noise prediction using ONERA and DLR Euler/Kirchhoff methods [J]. Journal of the AHS, 1999, 44 (2): 121-131.

[2] Brentner K S, Prediction of helicopter rotor discrete frequency noise—a computer program incorporating realistic motions and advanced acoustic formulation [R]. ASA-TM-87721, 1986.

[3] Brentner K S, Br s G A, Perez G, et al, Maneuvering rotorcraft noise prediction: a new code for a new problem [A]. Proceedings of the AHS Aerodynamics Acoustics and Test Evaluation Specialist Meeting [C]. 2002.

[4] Desopper A, Lafon P, Philippe J J, et al. Effect of an Anhedral Sweptback Tip on the Performance of a Helicopter Rotor [J]. Vertica, 1988, 12 (4): 345-355.

[5] 徐国华, 直升机旋翼噪声分析及估算方法 [D]. 南京: 南京航空学院.

[6] 孙 曜, 汪鸿振. 直升机旋翼噪声研究概述 [J]. 噪声与振动控制, 2003 (94): 22-25.

[7] 徐国华, 高 正. 悬停状态下模型旋翼噪声试验的初步研究 [J]. 空气动力学学报, 1996 (1): 68-71.

[5] Montemerlo M, Thnm S, Koller D, et al. FastSLAM; a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem [A]. Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence [C]. Edmonton, Canada, 2002; 593-598.

[6] 郭剑辉, 赵春霞, 陆剑峰, 等. Rao-Blackwellised 粒子滤波 SLAM 的一致性研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (23): 6401-6405.

[7] 李 季, 孙秀霞. 基于改进 A-Star 算法的无人机航迹规划算法研究 [J]. 兵工学报, 2008 (7): 787-792.

[8] 周 武, 赵春霞, 沈亚强, 等. 基于全局观测地图模型的 SLAM 研究 [J]. 机器人, 2010, 32 (5): 647-654.

[9] Murphy K. Bayesian map learning in dynamic environments [J]. Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), 1999; 1015-1021.

[10] Oucet A, de Freitas N, Murphy K et al. Rao-blackwellised particle filtering for dynamic Bayesian networks [A]. Proceedings of the Sixteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence [C]. 2000; 176-183.

[11] Mullane J, Vo B N, Adams M, et al. A random finite set approach to Bayesian slam [J]. IEEE Trans. Robotics, 2011, 27; 268-282.