2020 MathWorks 中国汽车年会

自动驾驶开发中的MATLAB语言应用及其符合功能安全要求的最佳实践

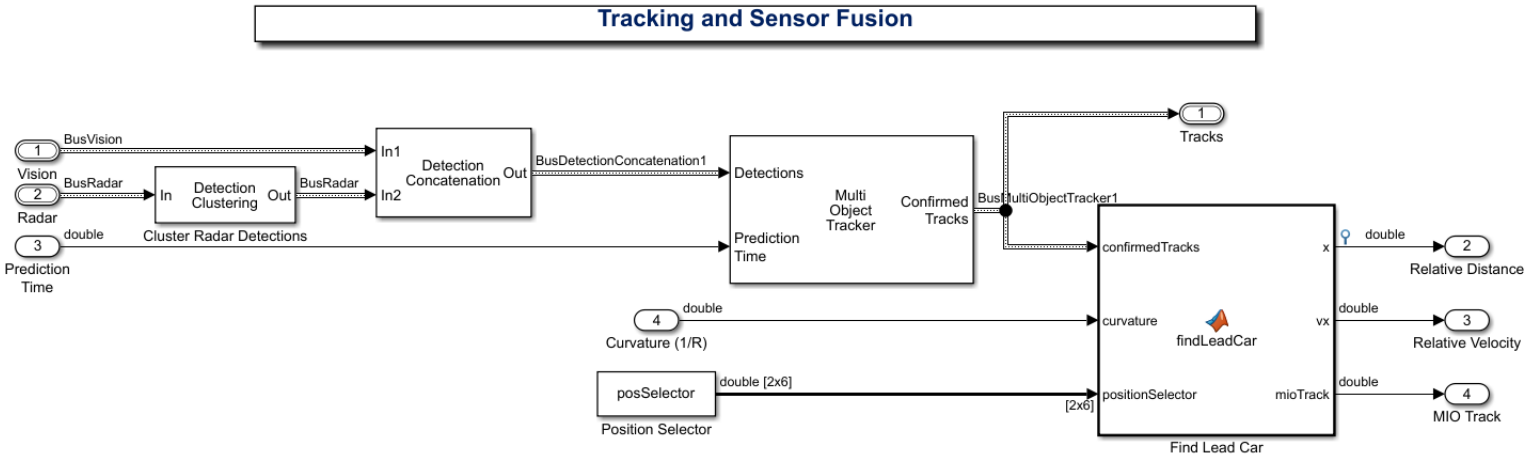
徐天皓
MathWorks中国区高级技术咨询顾问

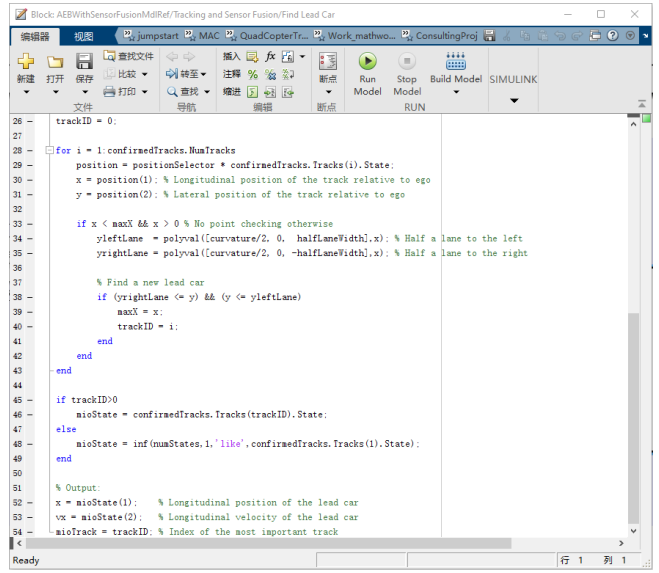
MathWorks®

简介

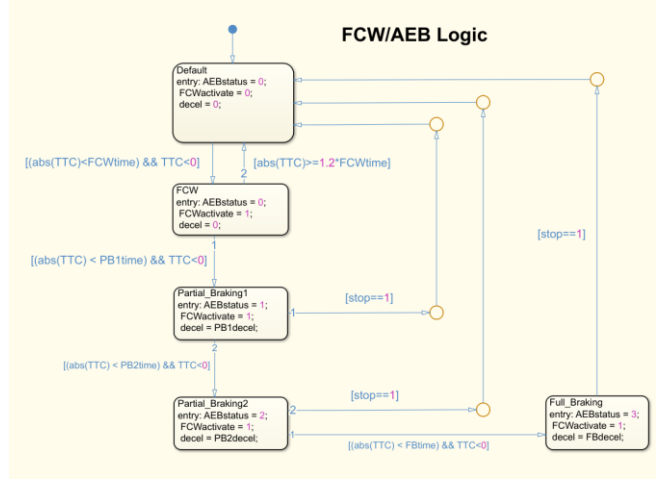
- 我们已经知道Simulink和Stateflow适合为ISO 26262 QM到ASIL-D的应用程序生成代码
- MATLAB 已经逐渐被用于设计 AD/ADAS 的算法原型
  - 适用于矩阵，图像处理，深度学习的编程语言
  - 大量的专业算法函数：包括传感器融合，统计和机器学习，图形处理、自动驾驶，深度学习等工具箱
  - 丰富的支持代码生成的语言功能
  - MATLAB语言也可以无缝集成到敏捷工作流工具中

MATLAB语言与自动驾驶



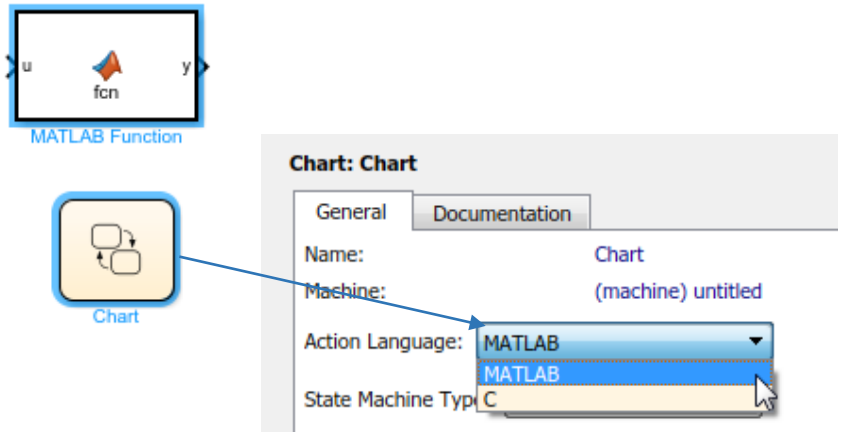


我们可以从MATLAB生成可通过认证的代码吗?

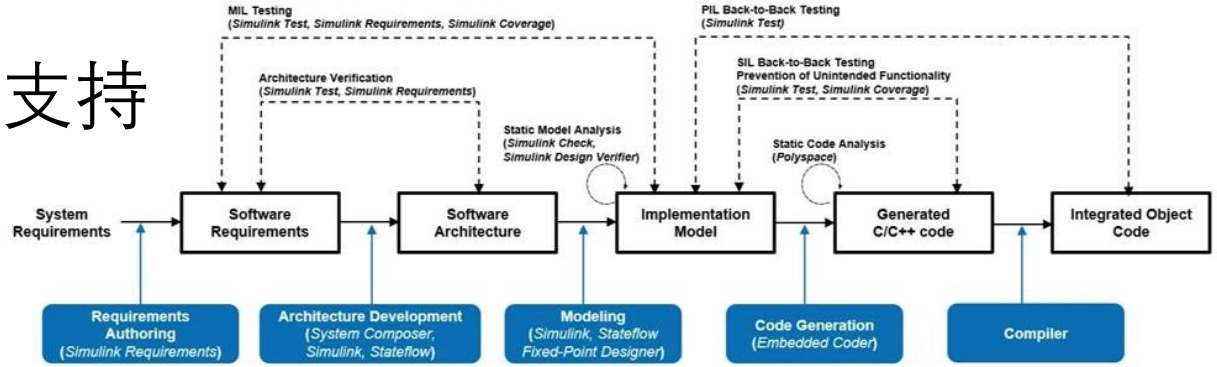


Yes! MATLAB和Simulink集成

- MATLAB语言可由MATLAB Function模块和/或Stateflow调用
  - MATLAB运算符
  - MATLAB函数

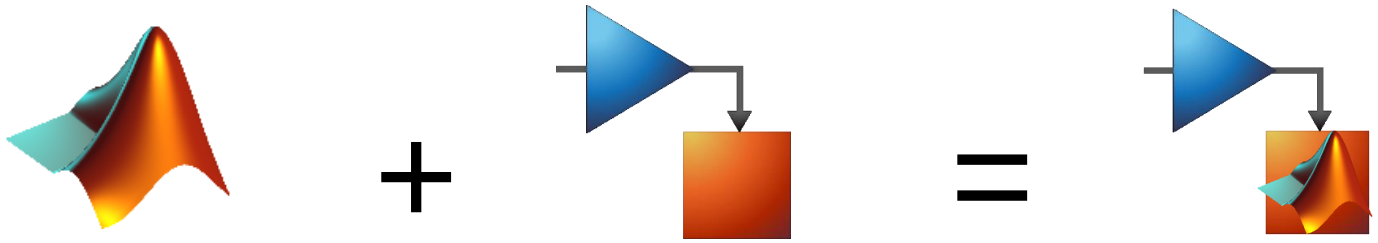


- 我们的IEC认证套件和参考工作流程支持Simulink/MATLAB代码生成



最佳实践

- 我们可以将这些结合起来，并兼得两全其美
  - + MATLAB语言的丰富性
  - + Simulink验证工具系列的严格性



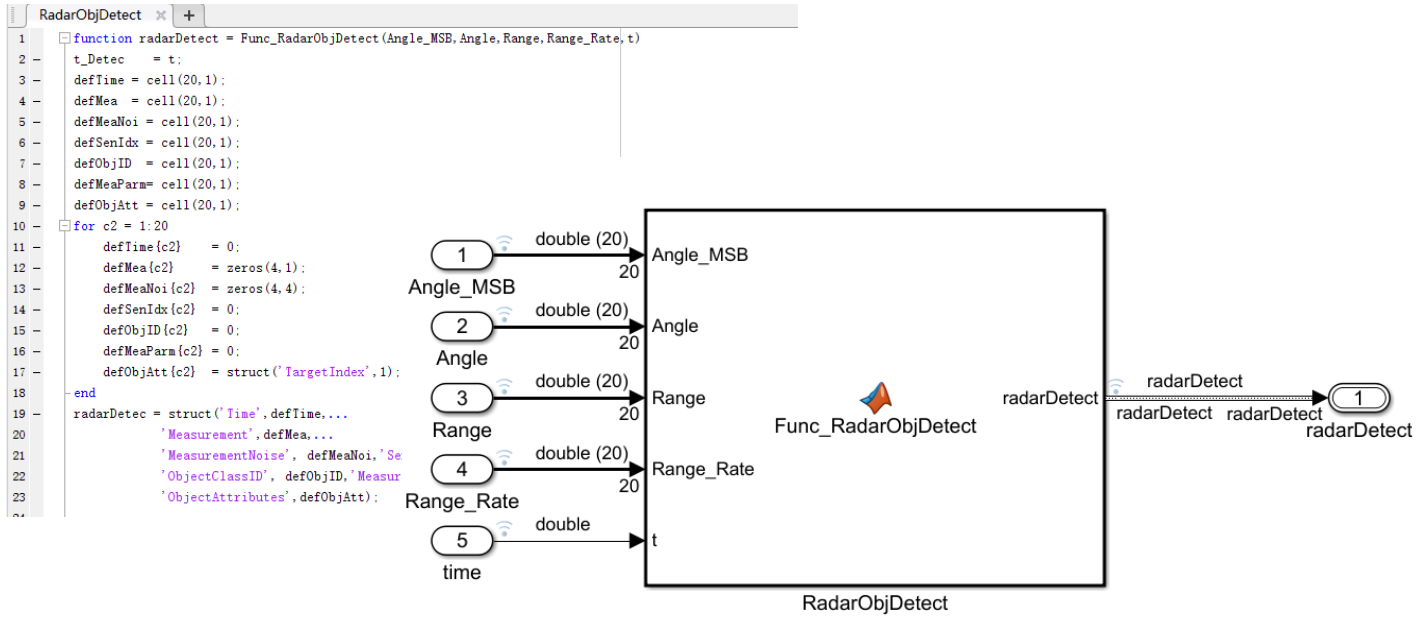
“我是MATLAB用户，Simulink对我有用吗?”

➔如果您需要提供**符合性证明**

➔定义MATLAB算法的数据流、控制流**架构**

MATLAB + Simulink ISO 26262 工作流程

- 我们的ISO验证流程现在支持这种组合语言
  - 需求可追溯性
  - 设计规范的符合性
  - 证明正确的功能
  - 证明没有意外功能
  - 软件的设计说明



需求可追溯性

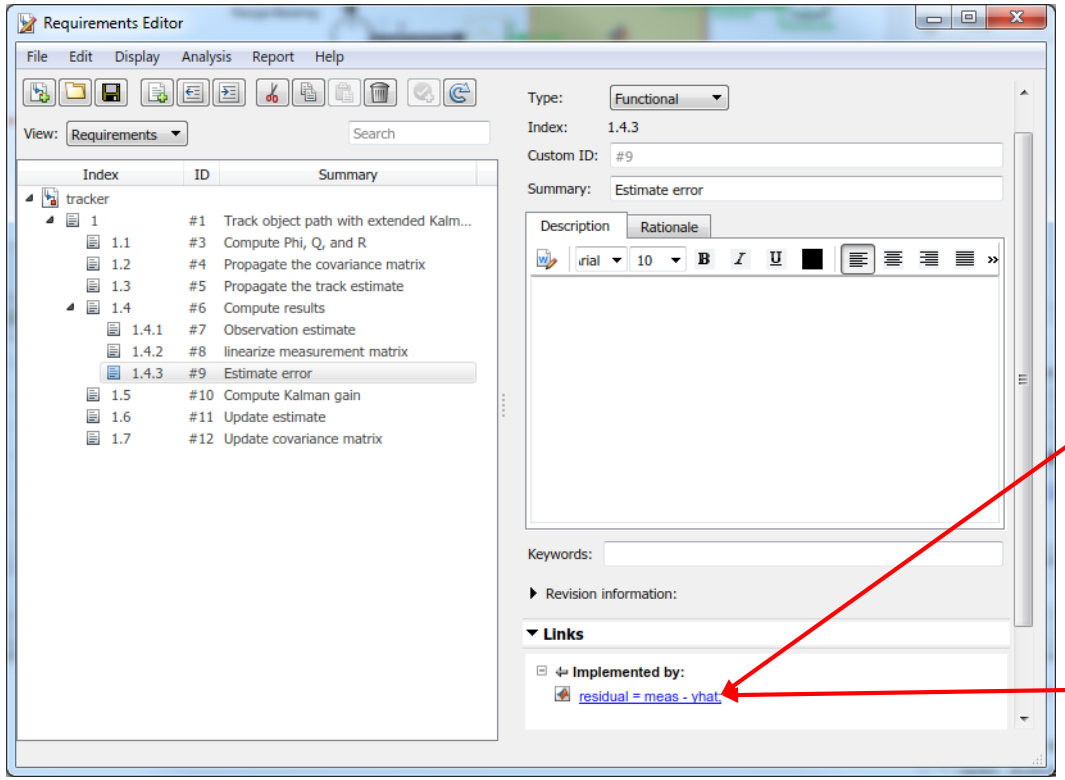
Simulink Requirements

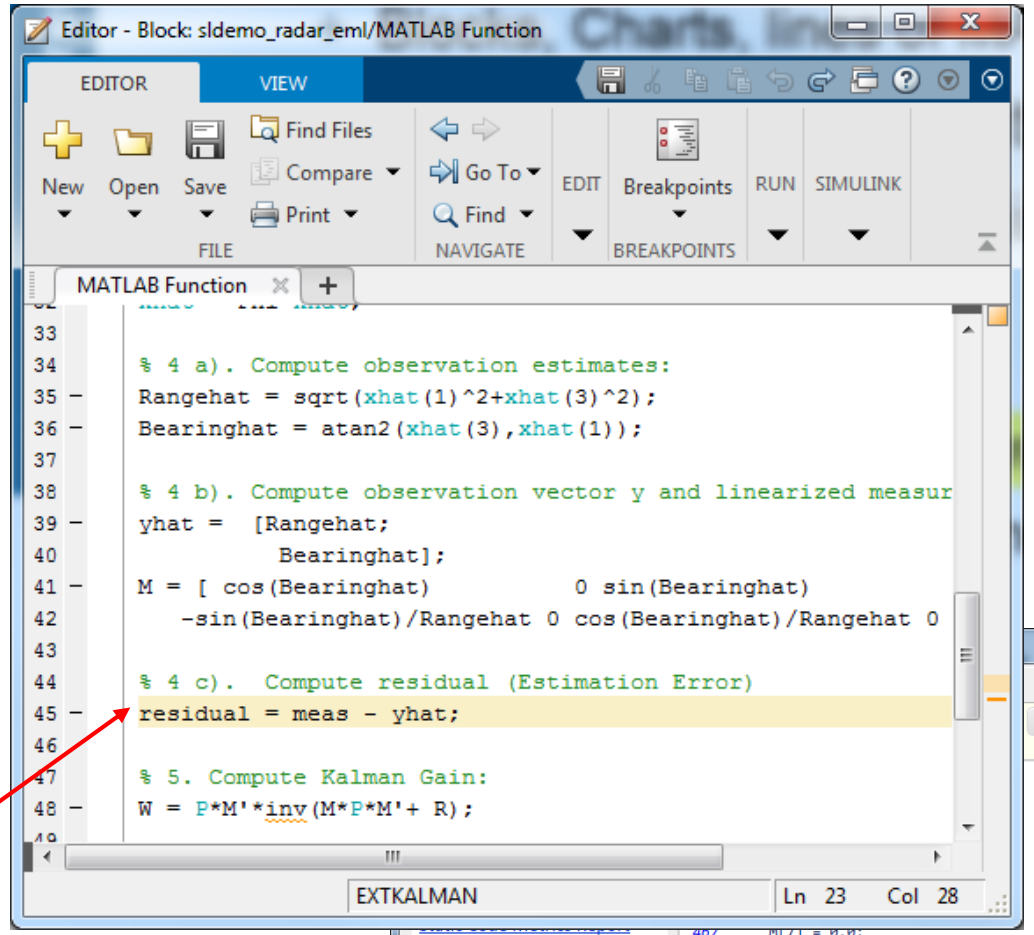
+Simulink Requirements 支持撰写需求，导入/导出需求、以及将需求链接到模型元素、代码及测试用例：

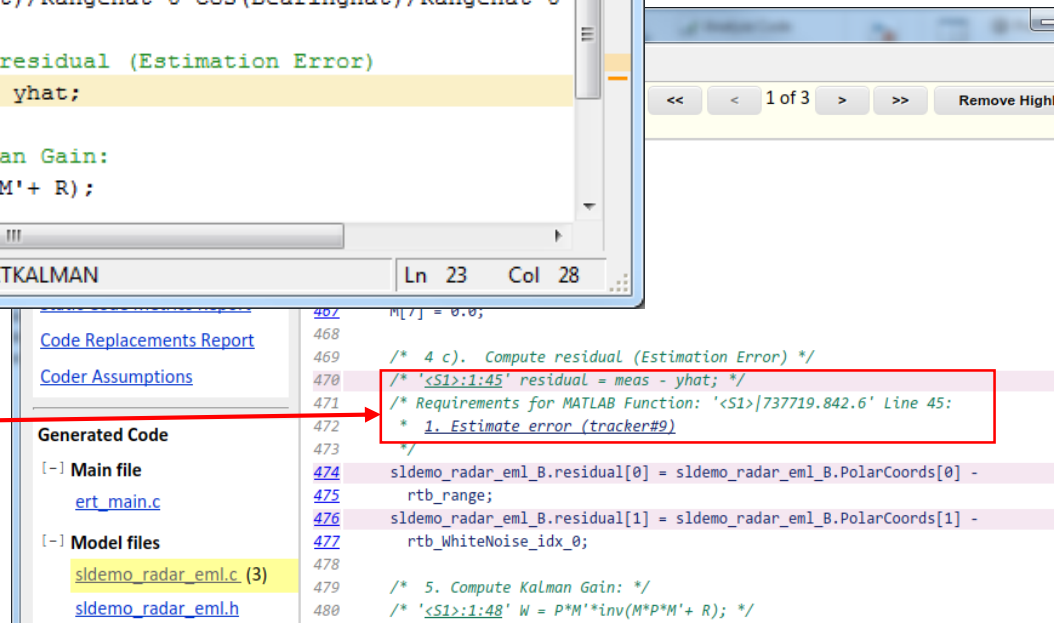
+ 您可以将需求链接到MATLAB函数中的**代码行**，就像将需求链接到Simulink模块一样。
+ 链接到MATLAB代码行中的**需求**可以生成为**注释**嵌入到自动代码中
+ **MATLAB源代码和用户注释**也可以作为注释包括在自动代码内

+生成**需求追溯性报告**以获取证据

需求可追溯性样本


Requirements Editor
File Edit Display Analysis Report Help
View: Requirements
Search
Index ID Summary
tracker
1 #1 Track object path with extended Kalm...
1.1 #3 Compute Phi, Q, and R
1.2 #4 Propagate the covariance matrix
1.3 #5 Propagate the track estimate
1.4 #6 Compute results
1.4.1 #7 Observation estimate
1.4.2 #8 linearize measurement matrix
1.4.3 #9 Estimate error
1.5 #10 Compute Kalman gain
1.6 #11 Update estimate
1.7 #12 Update covariance matrix
Type: Functional
Index: 1.4.3
Custom ID: #9
Summary: Estimate error
Description Rationale
Keywords:
Revision information:
Links
Implemented by:
residual = meas - yhat;

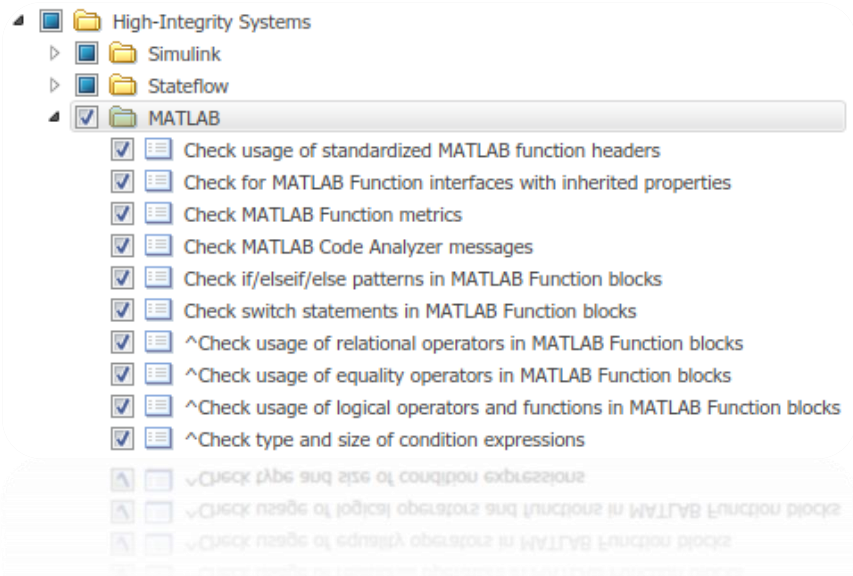

Editor - Block: sldemo_radar_eml/MATLAB Function
EDITOR VIEW
New Open Save Find Files Compare Print Go To Find
FILE NAVIGATE
EDIT Breakpoints RUN SIMULINK
BREAKPOINTS
MATLAB Function
33
34 % 4 a). Compute observation estimates:
35 Rangehat = sqrt(xhat(1)^2+xhat(3)^2);
36 Bearinghat = atan2(xhat(3),xhat(1));
37
38 % 4 b). Compute observation vector y and linearized measur
39 yhat = [Rangehat;
40 Bearinghat];
41 M = [cos(Bearinghat) 0 sin(Bearinghat)
42 -sin(Bearinghat)/Rangehat 0 cos(Bearinghat)/Rangehat 0
43
44 % 4 c). Compute residual (Estimation Error)
45 residual = meas - yhat;
46
47 % 5. Compute Kalman Gain:
48 W = P*M'*inv(M*P*M'+ R);
EXTKALMAN
Ln 23 Col 28

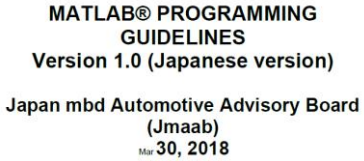

Code Replacements Report
Coder Assumptions
Generated Code
Main file
ert_main.c
Model files
sldemo_radar_eml.c (3)
sldemo_radar_eml.h
/* 4 c). Compute residual (Estimation Error) */
/* '<S1>:1:45' residual = meas - yhat; */
/* Requirements for MATLAB Function: '<S1>|737719.842.6' Line 45:
* 1. Estimate error (tracker#9)
*/
sldemo_radar_eml_B.residual[0] = sldemo_radar_eml_B.PolarCoords[0] -
rtb_range;
sldemo_radar_eml_B.residual[1] = sldemo_radar_eml_B.PolarCoords[1] -
rtb_WhiteNoise_idx_0;
/* 5. Compute Kalman Gain: */
/* '<S1>:1:48' W = P*M'*inv(M*P*M'+ R); */

设计和代码规范

Simulink Check

- Simulink Check可以检查是否具有良好的代码合规性
  - 降低复杂度
  - 强化注释密度
  - MATLAB and Simulink之间的强数据类型
  - 查找具有混合数据类型的逻辑运算符
- 实施模型检查以搜索未链接到需求的MATLAB代码。
- MISRA-C相关的MATLAB Coder和Embedded Coder设置
- MATLAB 代码规范





展示正确的功能

Simulink Requirements

Simulink Design Verifier

Simulink Test

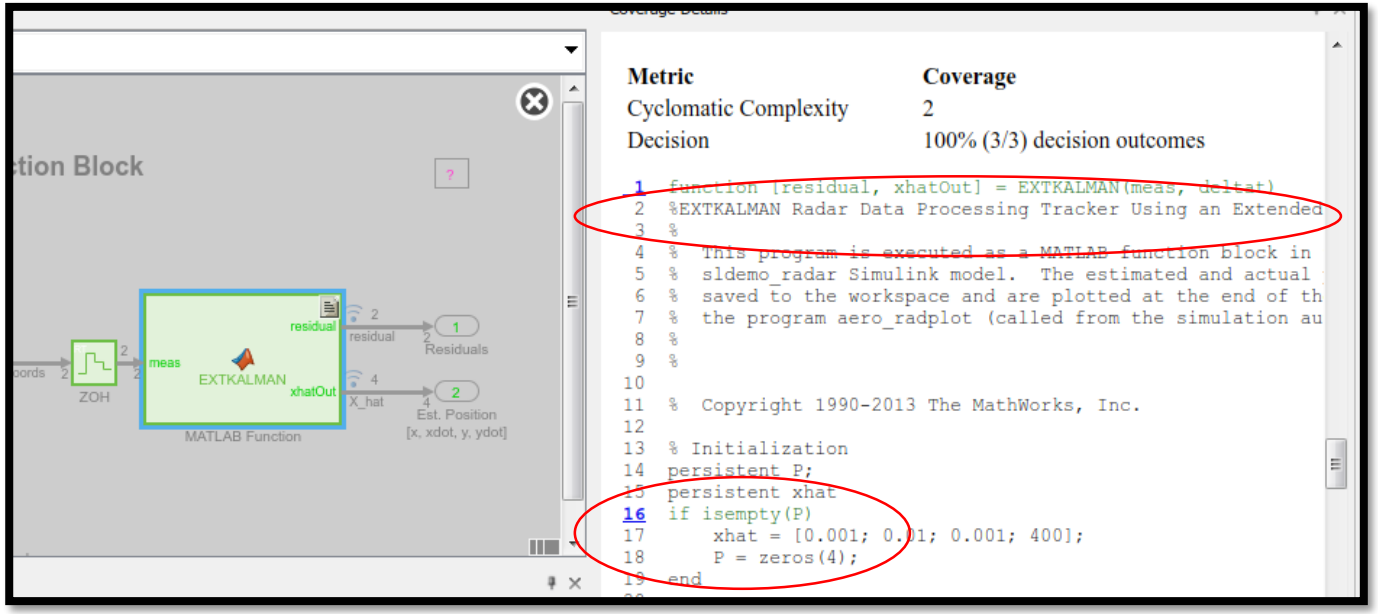
+ 基于需求撰写测试用例, 并将测试用例与链接到需求。
+ Simulink Design Verifier 设计错误检测
+ Simulink Design Verifier 形式化验证
+ 通过Simulink Test执行测试用例
+ 从模型到代码进行软件在环 (SIL), 处理器在环 (PIL)测试。

表明没有任何意外功能

Simulink Coverage

Simulink Design Verifier

- Simulink Coverage显示测试用例的完整性
  - 模型覆盖度
  - SIL/PIL代码覆盖度
- Simulink Design Verifier可用于补足测试用例，确保背靠背测试的完整性。



软件设计说明报告

- 在提供ISO 26262符合性证据中需要提供软件的设计说明报告。

> **8.5.1 Software unit design specification** resulting from requirements 8.4.2 to 8.4.5.
>
> NOTE In the case of model-based development, the implementation model and supporting descriptive documentation, using methods listed in Tables 5 and 6, specifies the software units.

- MATLAB/Simulink Report Generator™包含预定义的系统设计报告模板。
  - 建议自定义模板以包含外部MATLAB代码。

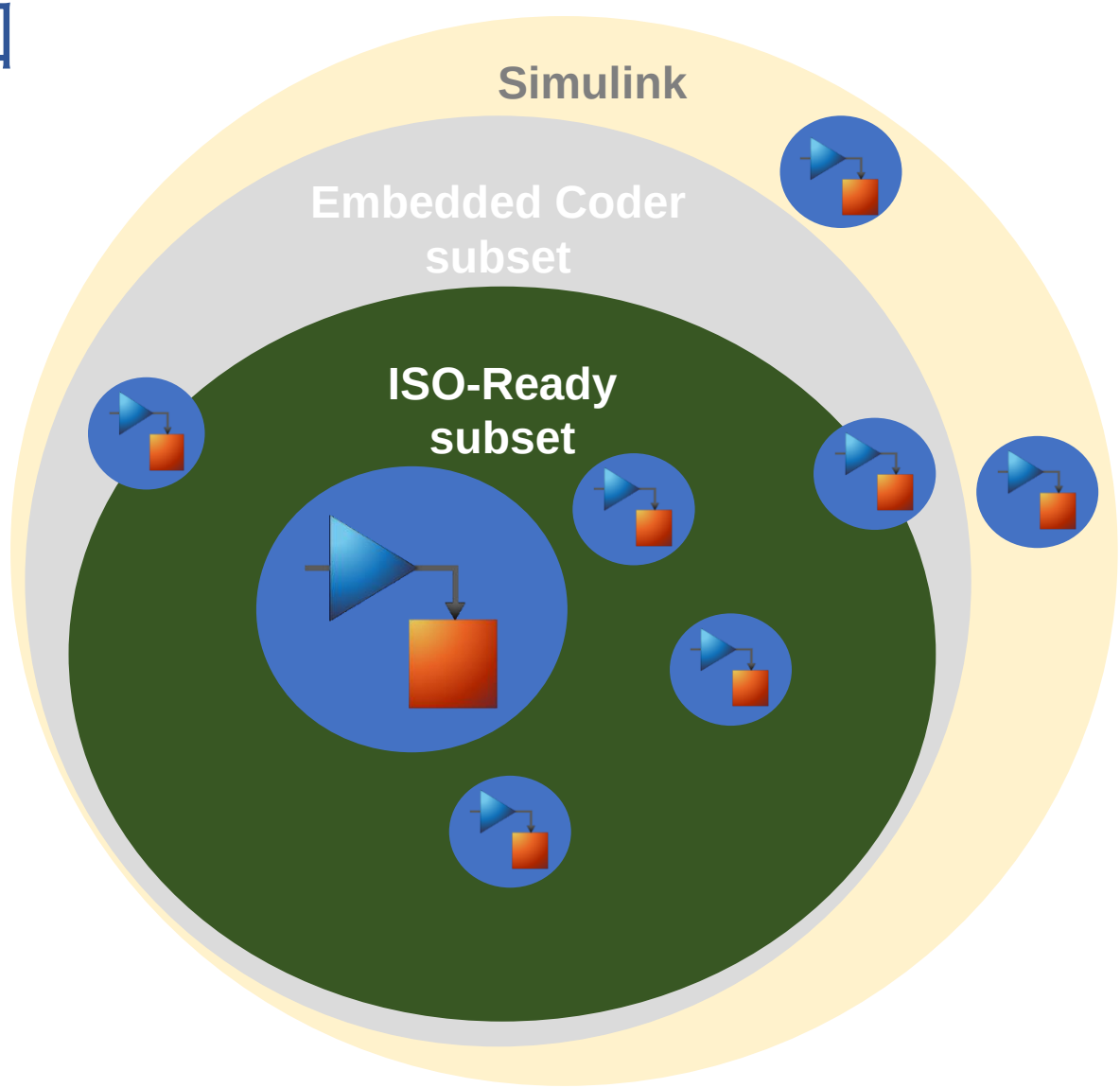
Simulink Report Generator

到目前为止的总结

- 客户今天已成功在符合ISO 26262的产品中使用MATLAB
- 我们的验证工作流程和工具支持Simulink调用的MATLAB
- 但是…依然存在挑战
  - 符合代码标准：从MATLAB生成的代码的MISRA-C兼容性的潜在问题
  - MATLAB vs C代码覆盖度

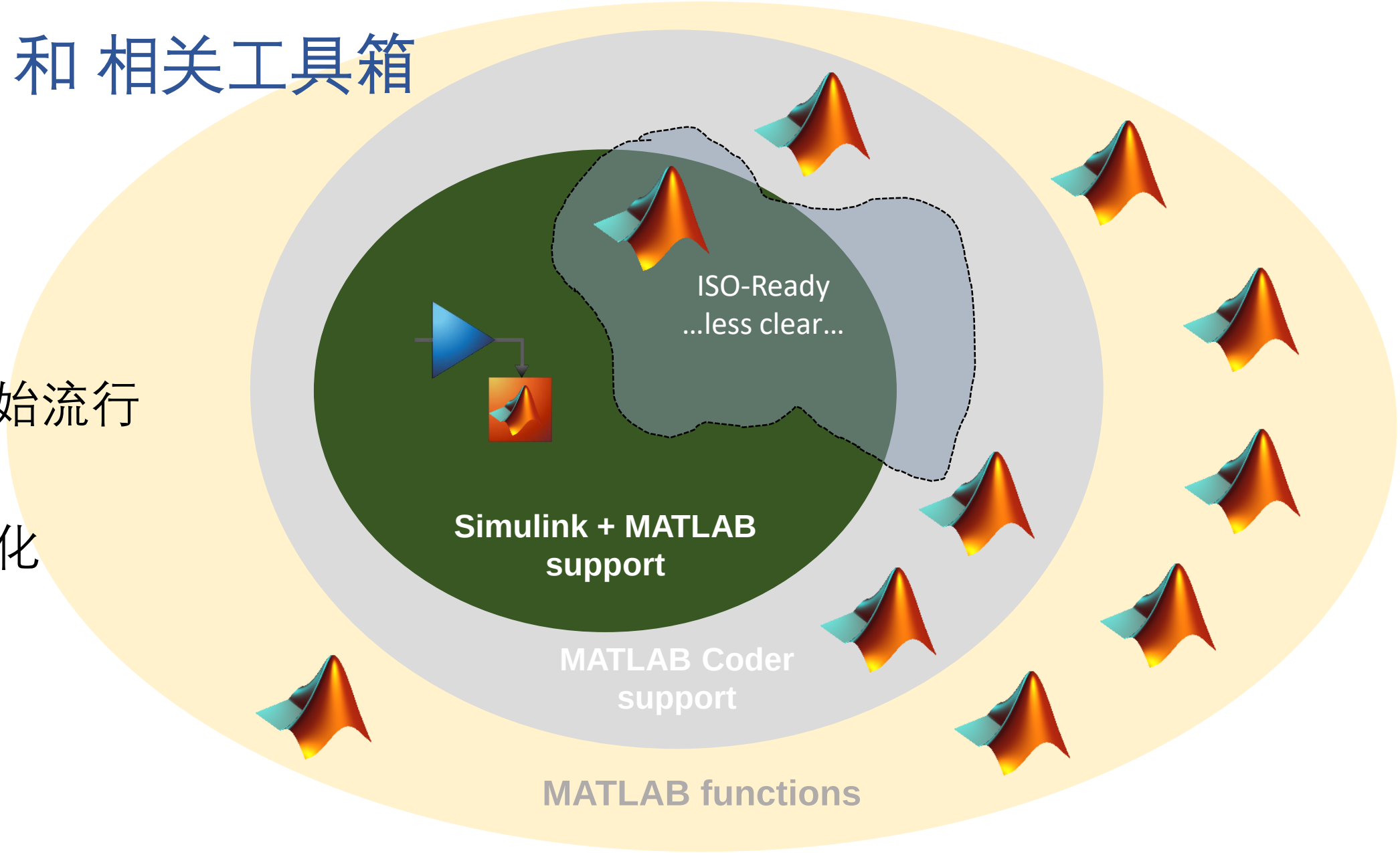
Simulink核心模块和工具箱

- 广泛接受
- 丰富的工具支持
- 经过充分验证



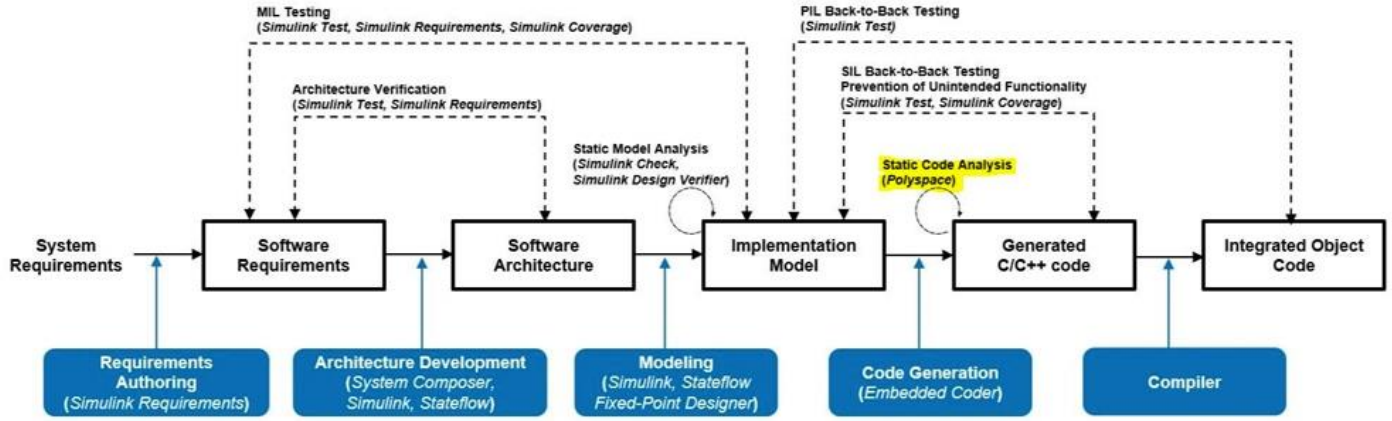
MATLAB 和 相关工具箱

- 逐渐开始流行
- 不断优化



应对挑战：符合代码标准

- 要评估从MATLAB生成的代码对MISRA®C的兼容性，请使用静态代码分析器工具（例如Polyspace Bug Finder™）来检测不符合MISRA C的代码，并调查结果。 如果不兼容的代码来自内置的MATLAB函数，则有两个处理方法：
  - 为MISRA C的警告写理由
  - 用重写的函数替换内置的MATLAB函数，并对非推荐代码/函数实施Model Advisor检查。

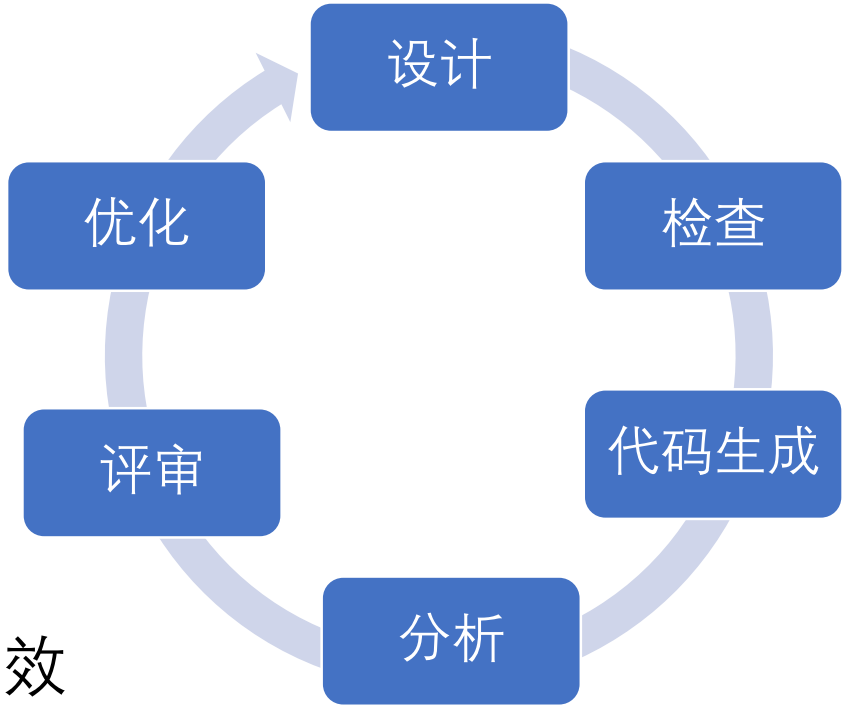


应对挑战：符合代码标准

- **最佳实践**是
  - 运行模型检查 **Simulink Check**
  - 生成代码
  - 分析合规性 **Polyspace Bug Finder**

- 如果发现问题
  - 记录并继续
  - 修改算法或使用一个兼容功能

- 定制一个功能子集(语言子集)
- 随着时间的流逝，这个过程将变得越来越高效



应对挑战：代码覆盖度

- MATLAB函数用C / C ++实现可能很复杂

```
% 5. Compute Kalman Gain:
W = P*M'*inv(M*P*M'+ R);
```

- 一条测试用例就能覆盖的MATLAB代码，实际上还需要更多的测试用例才能在生成的C中不显示任何意外功能

- 策略包括
  - 开发功能/特性的单元测试
  - 使用一个更简单的C代码实现
  - 通过链接到测试用例的coverage justification filter跟踪缺失覆盖度的外部MATLAB代码

```
480     /*  5. Compute Kalman Gain: */
481     /* '<S1>:1:48' W = P*M'*inv(M*P*M'+ R); */
482     for (i = 0; i < 2; i++) {
483       for (iU = 0; iU < 4; iU++) {
484         Phi_tmp_tmp = (int32_T)((int32_T)(iU << 1) + i);
485         x_tmp[(int32_T)(iU + (int32_T)(i << 2))] = M[Phi_tmp_tmp];
486         M_0[Phi_tmp_tmp] = 0.0;
487         Phi_tmp = (int32_T)(iU << 2);
488         M_0[Phi_tmp_tmp] += sldemo_radar_eml_DWork.P[Phi_tmp] * M[i];
489         M_0[Phi_tmp_tmp] += sldemo_radar_eml_DWork.P[(int32_T)(Phi_tmp + 1)] *
490           0.0;
491         M_0[Phi_tmp_tmp] += sldemo_radar_eml_DWork.P[(int32_T)(Phi_tmp + 2)] *
492           M[(int32_T)(i + 4)];
493         M_0[Phi_tmp_tmp] += sldemo_radar_eml_DWork.P[(int32_T)(Phi_tmp + 3)] *
494           0.0;
495       }
496     }
497
498     for (i = 0; i < 2; i++) {
499       for (iU = 0; iU < 2; iU++) {
500         Phi_tmp_tmp = (int32_T)(i << 2);
501         Phi_tmp = (int32_T)((int32_T)(i << 1) + iU);
502         Phi_1[Phi_tmp] = (((x_tmp[(int32_T)(Phi_tmp_tmp + 1)] * M_0[(int32_T)(iU
503           + 2)] + x_tmp[Phi_tmp_tmp] * M_0[iU]) + x_tmp[(int32_T)(Phi_tmp_tmp +
504           2)] * M_0[(int32_T)(iU + 4)]) + x_tmp[(int32_T)(Phi_tmp_tmp + 3)] *
505                         M_0[(int32_T)(iU + 6)]) + R[Phi_tmp];
506       }
507     }
508
509     if (fabs(Phi_1[1]) > fabs(Phi_1[0])) {
510       rtb_range = Phi_1[0] / Phi_1[1];
511       rtb_WhiteNoise_idx_0 = 1.0 / (rtb_range * Phi_1[3] - Phi_1[2]);
512       M_tmp = Phi_1[3] / Phi_1[1] * rtb_WhiteNoise_idx_0;
513       M_tmp_0 = -rtb_WhiteNoise_idx_0;
514       y_idx_2 = -Phi_1[2] / Phi_1[1] * rtb_WhiteNoise_idx_0;
515       rtb_WhiteNoise_idx_0 *= rtb_range;
516     } else {
517       rtb_range = Phi_1[1] / Phi_1[0];
518       rtb_WhiteNoise_idx_0 = 1.0 / (Phi_1[3] - rtb_range * Phi_1[2]);
519       M_tmp = Phi_1[3] / Phi_1[0] * rtb_WhiteNoise_idx_0;
520       M_tmp_0 = -rtb_range * rtb_WhiteNoise_idx_0;
521       y_idx_2 = -Phi_1[2] / Phi_1[0] * rtb_WhiteNoise_idx_0;
522     }
```

总结

- 客户已成功在兼容ISO 26262的产品中使用Simulink 与 MATLAB

- 完善整个流程
  - 解决从MATLAB生成的代码的MISRA-C兼容性的潜在问题
  - 实现MATLAB到C代码的代码覆盖度
  - 定制化单元设计报告或其他定制化工具开发

MathWorks Consulting Services

- 延伸资料：Best practices for Simulink and MATLAB for ISO-26262
- 联系方式：<alexxu@mathworks.com>