

# 基于 AUTOSAR 规范的汽车 ECU 软件开发方法

刘玺斌<sup>1,2</sup>, 马建<sup>1</sup>, 宋青松<sup>2,3</sup>

(1. 长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710043;

3. 长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对汽车 ECU 常规开发方法用于整车系统级分析与建模所存在的缺陷与不足, 基于汽车开放式系统架构 (AUTOSAR) 基本理论, 首先阐述了 AUTOSAR 规范的层次化、模块化系统架构及层间接口, 进而建立一个由架构定义与 ECU 配置两个阶段构成的 AUTOSAR 实现过程, 最后结合市场典型的 AUTOSAR 工具, 给出一个系统的汽车 ECU 软件开发解决方法。研究结果表明, 所提方法简洁高效的, 能够保证整车电子控制软件系统的可扩展性、模块可重用性与可靠性, 这对于低成本高可靠性的汽车 ECU 系统开发具有重要指导意义。

**关键词:** 电动汽车; 汽车电子; 嵌入式控制单元; 软件架构

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2013)11-0151-04

## Software development method based on AUTOSAR for automobile ECUs

LIU Xi-bin<sup>1,2</sup>, MA Jian<sup>1</sup>, SONG Qing-song<sup>2,3</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Heavy-duty Automobile Co. Ltd, Xi'an 710043, China;

3. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of traditional automobile ECU development methods for the whole vehicle system-level analysis and modeling, and based on the basic theories of Automobile Open System Architecture (AUTOSAR), the hierarchical modular system architecture and the inter-layer interfaces for AUTOSAR are expatiated on at first, and then, an implementation process consisted of two phases, i.e., architecture definition phase and ECU configuration phase, are established. And finally, considering with typical AUTOSAR tools on market, one systematical resolution for automobile ECU software development is proposed. The results show that the proposed resolution is simple and efficient, which can ensure the expansibility, modular-re-use and reliability for the electric control software system of the whole vehicle; it has important significance for high reliability and low cost automobile ECU system developments. 6 figs, 15 refs.

**Key words:** electric vehicle; automotive electronics; embedded controller units; software architecture

汽车电子涉及的控制单元越来越多, 控制系统越来越庞大复杂, 软件代码量急速上升, 相应地, 嵌入式控制单元 (ECU) 的软件开发也变得日益困难。由于汽车电子硬件平台的多样性, ECU 软件开发依赖硬件和系统配置, 每次约束条件的改变 (比如硬件的升级改造) 都将导致软件大量修改甚至重新编写。特别是针对整车系统级分析与建模问题, ECU 常规开发方法面临巨大挑战<sup>[1-3]</sup>。如果没有革新的开发模式与统一的软件架构来规范各个 ECU 的开发, 整车开发周期和开发成本将受到很大影响<sup>[4]</sup>。

开放的、标准化的体系架构, 对于提高 ECU 软件 (或部分软件模块) 的可重用性, 最终改善汽车电子软件系统的可靠性和稳定性, 具有重要意义。由宝马、戴姆勒克莱斯勒、福特等主流汽车制造商、博世等零部件供应商, 以及半导体和

软件公司联合推出的汽车开放系统架构 AUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture) 就是这样一个最具代表性的架构规范, 它已经成为汽车 ECU 事实上的开放式系统架构标准<sup>[5-7]</sup>。

为促进 AUTOSAR 在 OEMs 的应用, 首先讨论 AUTOSAR 定义的系统架构与标准接口, 然后阐述 AUTOSAR 基本方法与开发流程, 最后给出一个符合 AUTOSAR 规范的汽车 ECU 软件开发解决方案。

## 1 AUTOSAR 系统架构与标准接口

### 1.1 分层的系统架构

传统的汽车电控软件开发是以硬件为中心的, 软件严重依赖于硬件平台 (如图 1(a) 所示), 硬件平台的改变将导致软件维护成本剧增。而 AUTOSAR 的提出, 旨在为汽车电子软件行业提供一个统一的开放的软件架构标准, 以解决传统汽车

收稿日期: 2013-04-26

稿件编号: 201304326

基金项目: 国家 863 计划项目 (2012AA1111106)

作者简介: 刘玺斌 (1963—), 男, 陕西西安人, 博士研究生, 高级工程师。研究方向: 新能源汽车技术及产业化。

电子软件可靠性重用性低的缺陷。如图1(b)所示,AUTOSAR通过定义标准化的软件功能组件与软件功能组件接口,将与硬件有关的基础软件进行标准化与平台化,从而实现上层应用软件和与底层硬件有关的软件相互独立,切实提高软件的更新和升级能力。

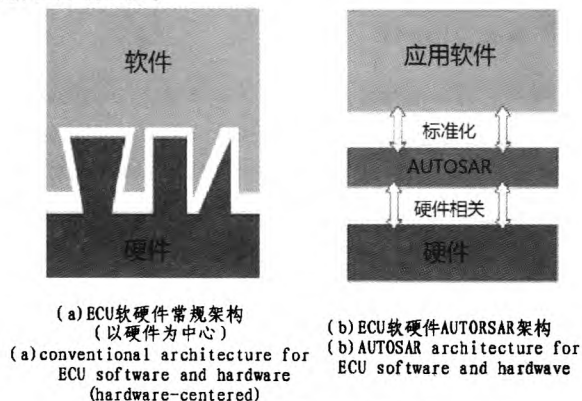


图1 AUTOSAR 软件与硬件分离

Fig. 1 Software and hardware isolation in AUTOSAR

由于AUTOSAR提供底层ECU抽象,使得不再因ECU更换而需要在上层应用软件进行适应性修改;用户可以拥有独立于硬件的、自上而下的以软件为中心的软件平台,缩减软件的维护成本,特别是整车厂可以将精力集中放在上层应用程序的开发上,专注于更有竞争价值的上层功能实现。

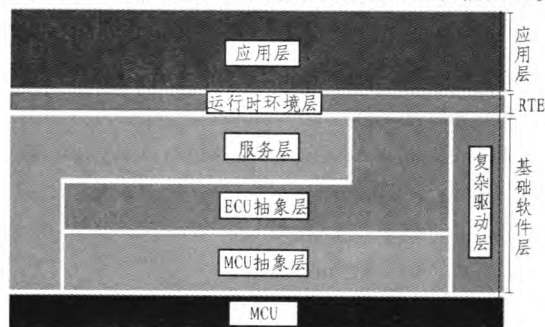


图2 AUTOSAR 分层结构

Fig. 2 Layered architecture for AUTOSAR

具体地,AUTOSAR将运行在底层硬件之上的软件划分为3大层,即应用层、运行时环境层与基础软件层,如图2所示。

1)应用层。应用软件以软件组件(SWC)的形式进行设计,每个SWC都封装一段运行在AUTOSAR基础软件架构上的可执行程序,并具有标准化的应用程序接口(API),通过运行时环境(RTE)进行通信。

2)运行时环境(RTE)层。RTE提供基础的通信服务,支持SWC之间的、以及SWC与BSW之间的通信(包括ECU内部的程序调用、ECU外部的总线通信等)。RTE的思想是提供一个虚拟功能总线(VFB),从而允许SWC请求任意的输入数据,而不必知道这些数据是从哪个ECU传送过来的,只需要向RTE发出请求即可。RTE使应用层软件完全脱离于具体的单个ECU和BSW。

3)基础软件(BSW)层。BSW层又被划分为3个子层:服务层、ECU抽象层、微控制器抽象层(MCAL),还存在一个特

殊的复杂驱动层。每一子层又划分为不同的功能模块,如图3所示。

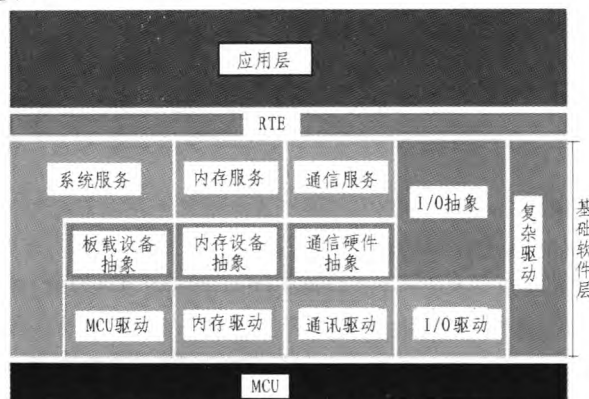


图3 AUTOSAR 基础软件层模块化功能结构

Fig. 3 Modular architecture for the BSW layer in AUTOSAR

服务层分为系统服务、内存服务、通信服务等模块。ECU抽象层分为板载设备抽象、内存设备抽象、通信硬件抽象与I/O抽象等。MCAL分为MCU驱动、内存驱动、通信驱动与I/O驱动等。

MCAL是BSW的最底层,包含了访问MCU的驱动。MCAL使上层软件与MCU分离,以便应用程序的移植。ECU抽象封装了MCAL以及MCU外围设备的驱动,并且将对MCU外围设备的访问进行了统一,使上层应用与ECU硬件相剥离。服务层是BSW的最上层,将各种基础软件功能模块以服务的形式封装起来,供应用层调用。

复杂驱动层可以直接访问MCU,以实现一些复杂的传感器和控制器操作,比如喷油控制、曲轴信号采集等。复杂驱动层具有重要意义,首先,它可以用于实现AUTOSAR不支持或者未标准化的硬件驱动;其次,它可以作为已存在的应用程序向AUTOSAR过渡的接口。

## 1.2 标准接口

AUTOSAR采用分层的模块化结构设计,并且每个功能模块都提供定义完善的标准化API。每一层只能使用下一层接口,并向上一层提供接口服务。AUTOSAR中API分为3类:标准接口(Standardized Interface)、AUTOSAR接口(AUTOSAR Interface)、以及标准化的AUTOSAR接口(Standardized AUTOSAR Interface)。

标准接口表现为C语言API形式,主要是MCAL、操作系统OS、ECU抽象、通信服务、系统服务等功能模块的接口。AUTOSAR接口主要是构成SWC的运行实体(Runnable Entity)、以及运行实体与ECU抽象、运行实体与复杂设备驱动等功能模块间的接口。标准化的AUTOSAR接口主要表现为BSW某些服务功能模块具有的特定服务端口,与ECU抽象无关。

相比于传统的软件架构,AUTOSAR至少有如下的技术创新:

1)提出了基础软件层BSW。通过使用平台化的BSW,既能增强软件质量,又能保证用户将精力集中到硬件无关的上

层功能开发上,提高用户的核心竞争力。

2)提出了 MCU 抽象层。这样即使 MCU 发生了变化,上层软件也不需要作重新调整和设计。

3)创建了运行时环境(RTE)。通过 API 封装,使得功能模块不再依赖于在哪个 ECU 中得到实现,它们之间的通信变得更加容易,对功能模块的划分和重定位成为可能。

## 2 AUTOSAR 方法与开发流程

### 2.1 SWC

整个开发过程围绕软件组件 SWC 展开。SWC 包括应用软件 SWC、传感器/执行器 SWC、标定 SWC、服务 SWC、ECU 抽象 SWC 以及复杂设备驱动 SWC 等。多个 SWC 通过 VFB 进行交互,形成系统应用软件。SWC 封装部分或全部汽车电子功能模块,包括具体的功能实现及对应的描述,如图 4 所示。

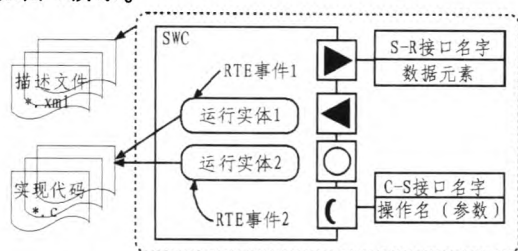


图 4 AUTOSAR 软件组件(SWC)组成

Fig. 4 Constitution of the SWC for AUTOSAR

SWC 对外表现形式是一系列的端口(Port)及对应的端口接口(Port-Interface)。每个 SWC 都需要定义 Port,SWC 通过 Port 和 Port-Interface 进行 SWC 之间的或者 SWC 与 BSW 之间的通信。

SWC 的内部行为通过运行实体表达,每个 SWC 由若干个运行实体组成。而每个运行实体由一组指令序列构成,与一个特定的 RTE 事件(RTEEvent)绑定。当绑定的 RTEEvent 发生时,对应的运行实体就会被触发。运行实体通过 Port 的数据或操作完成自身的功能,并把结果通过 Port 对外提供。这种交互通过 RTE 进行,导致运行实体的实现是平台无关的,从而 SWC 也是与平台无关的,最终改善了应用软件的可移植性和重用性。

SWC 必须提供功能模块的代码实现(即源代码)以及描述文件。代码实现可以通过建模工具进行设计并生成代码,也可手工编制。描述文件描述 SWC 的外在属性,包括所使用的端口、端口接口、运行实体及对应的 RTEEvent 等,最终以扩展标记语言(XML)文件形式对外提供。

### 2.2 开发流程

基于应用层 SWC 与 BSW-SWC 分离体系架构,AUTOSAR 工作流程可分为架构定义与 ECU 配置两个部分。

#### 1)架构定义

架构定义是完成对 SWC、ECU 和系统约束等 3 方面的形式化描述,如图 5 中所示。SWC 描述包括该 SWC 用到或被用到的数据与操作(端口与端口接口)、对网络和硬件的要求

(比如延时、定时等)、所需要的资源(内存、CPU 时间等)等。ECU 描述包括处理器、内存、通信外设、传感器及执行器、引脚分配等。系统约束描述包括对总线信号、网络拓扑、协议及 SWC-ECU 映射方面的约束等。架构定义的结果是获得包括总线映射的所有系统信息、以及 SWC 与 ECU 映射关系的系统配置描述文件。

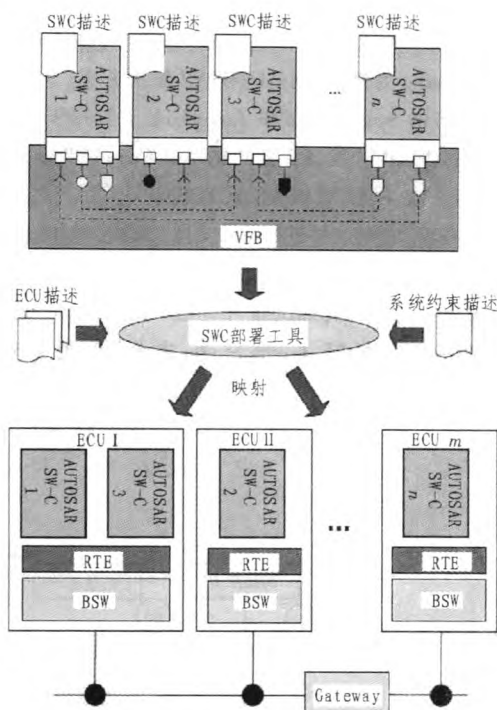


图 5 AUTOSAR 两阶段开发流程

Fig. 5 Two phase implementation process of AUTOSAR

#### 2)ECU 配置

ECU 配置主要是对 RTE 映射和 BSW 模块的配置。基于在架构定义阶段中产生的系统配置描述文件,提取出与各个 ECU 相关的系统配置描述信息,包括 ECU 通信矩阵、拓扑结构、映射到该 ECU 的所有 SWC 等。ECU 配置的动作主要是为当前 ECU 添加必要的信息和数据,比如运行实体与 OS 任务的映射、任务调度、必要的 BSW 模块及配置等。ECU 配置的结果是获得每个 ECU 的配置描述文件。

基于 ECU 配置描述文件可以生成当前 ECU 的 RTE 和 BSW 配置代码源文件,进一步综合 RTE 和 BSW 功能模块源代码,以及 SWC 源代码,编译链接,最终生成 ECU 可执行程序,完成整个开发过程。

## 3 AUTOSAR 解决方案

符合 AUTOSAR 规范的 ECU 软件开发过程中,系统架构、系统描述文件与 ECU 描述文件的抽取与源代码生成、以及 BSW 功能模块的配置均需要工具的支持。

具有代表性的 AUTOSAR 工具包括:

1)dSPACE 公司的系统架构工具 SystemDesk 与代码生成工具 TargetLink。

2)EB 公司的基础软件集成开发环境 EB Tresos Studio 与 AutoCore。

3)Vector 公司的 AUTOSAR 应用层开发工具。

4)Freescale 公司的基础软件包。

5)普华基础软件公司的符合 AUTOSAR 规范的工具链 Orientai studio。

6)浙江大学嵌入式研究中心的 SmartSAR。

下面以 dSPACE 公司的 SystemDesk 与 TargetLink, 以及 EB Tresos Studio 为例, 阐明 AUTOSAR 解决方案。

dSPACE 的 SystemDesk 和 TargetLink 工具用于完成系统层级的 AUTOSAR 开发, EB 公司的 AutoCore 和 Tresos Studio 工具用于完成 ECU 层级的 AUTOSAR 开发。之间通过 AUTOSAR-SWC 描述文件进行数据交换, 具体步骤如图 6 所示。

1)E1: 利用 SystemDesk 完成 AUTOSAR 系统架构;

2)E2 和 E3: 在 SystemDesk 中完成 SWC 到 ECU 的映射;

3)E4 和 E5: 在 EB Tresos Studio 中无法实现 BSW 服务

组件与应用组件之间的端口连接, 需要在 SystemDesk 中完成这项工作。因此, 在 EB tresos Studio 中先配置相应的服务模块, 然后导出符合 AUTOSAR 规范的服务组件描述, 再添加到 SystemDesk 中的 ECU Software Composition 中;

4)E6: 当配置完成整个 ECU 系统之后, 需要导出 AUTOSAR 系统描述文件。然后在 EB Tresos Studio 工程中添加一个系统描述导入器, 将 SystemDesk 生成的系统描述文件导入, 并选择一个 ECU 进行配置;

5)E7: 配置 COM, 可通过导入一个 DBC、FIBEX 或 LDF 文件完成;

6)E8: 信号映射, 将应用软件中的数据与 COM 中的信号进行映射;

7)E9: 配置 RTE 和 OS;

8)E10: 配置其它 BSW 模块;

9)E11: 生成代码, 并与应用软件的源代码链接, 编译生成目标可执行文件。

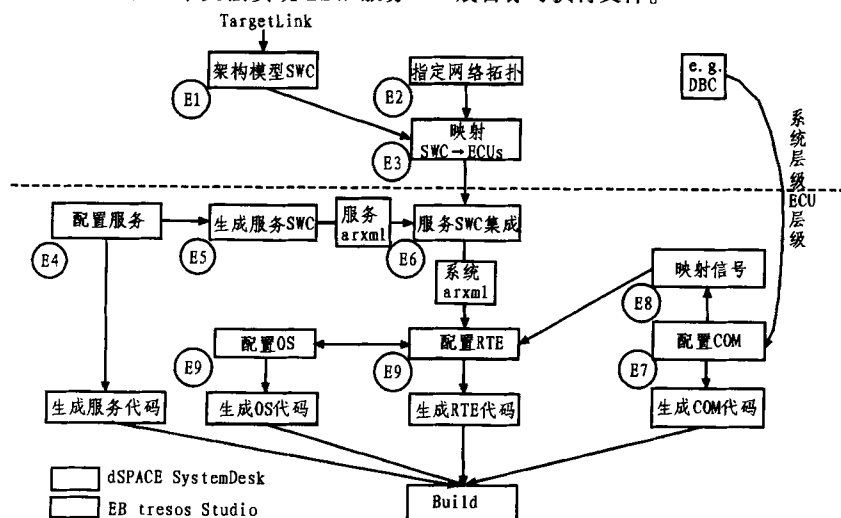


图6 dSPACE 与 EB 工具链 AUTOSAR 解决方案

Fig. 6 AUTOSAR resolution based on dSPACE and EB tool chains

## 4 结束语

AUTOSAR 是一套经过实践验证的分层软件架构规范, 通过标准化的 BSW 功能模块与接口, 使得上层应用程序和底层基础软件相互独立, 使得汽车软件的开发过程得到很大程度的简化。1)首先介绍了 AUTOSAR 分层体系架构及标准化接口。2)进而阐明了 AUTOSAR 方法与基本开发流程。3)最后给出了一个 AUTOSAR 汽车 ECU 软件开发解决方案。这对于促进符合 AUTOSAR 规范的、高可靠性并且成本低廉的汽车 ECU 软件开发具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Alberto S-V, Marco Di N. Embedded system design for automotive applications[J]. Computer, 2007, 40(10):42-51.
- [2] 魏学哲, 戴海峰, 孙泽昌. 汽车嵌入式系统开发方法、体系架构和流程[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(7): 1064-1070.

WEI Xue-zhe, DAI Hai-feng, SUN Ze-chang. Methodology, architecture and development flow of automotive embedded systems [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(7): 1064-1070.

- [3] 方道, 姜瑜涛, 张晚先, 等. 汽车电子基础软件标准体系研究[J]. 信息技术与标准化, 2011(8):30-33.

FANG Qiu, JIANG Yu-tao, ZHANG Xiao-xian, et al. Research on standard system of automobile electronics fundamental software[J]. Information Technology and Standardization, 2011 (8):30-33.

- [4] 杨国青. 基于模型驱动的汽车电子软件开发方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

- [5] 罗端, 李红, 方正, 等. 基于AUTOSAR的汽车电子诊断系统的开发[J]. 汽车工程, 2012, 34(2):179-183.

LUO Duan, LI Hong, FANG Zheng, et al. Development of

(下转第 157 页)

$$\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}.$$

通过求解式(15)表示的凸优化问题确定满足式(7)的  $H_\infty$  保代价控制器。

$\rho = \text{diag}(0.5, 0.5)$ , 求  $K = \begin{bmatrix} 30.0416 & 5.2202 \\ -55.9109 & -9.5226 \end{bmatrix}$ ,  $J^* = 3.2079$ 。相应的曲线如图1所示;  $\rho = \text{diag}(0, 0.5)$ , 求  $K = \begin{bmatrix} 85.4611 & 20.0113 \\ -27.1191 & -5.6501 \end{bmatrix}$ ,  $J^* = 0.7889$ 。相应的曲线如图2所示。

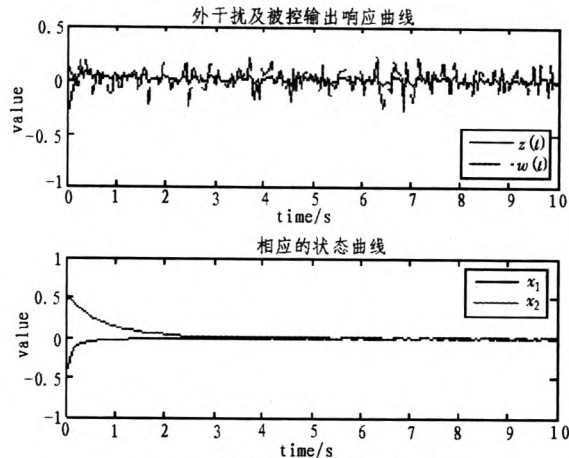


图1 干扰条件下系统状态与输出曲线  
Fig.1 Responds of system states & outputs with disturb

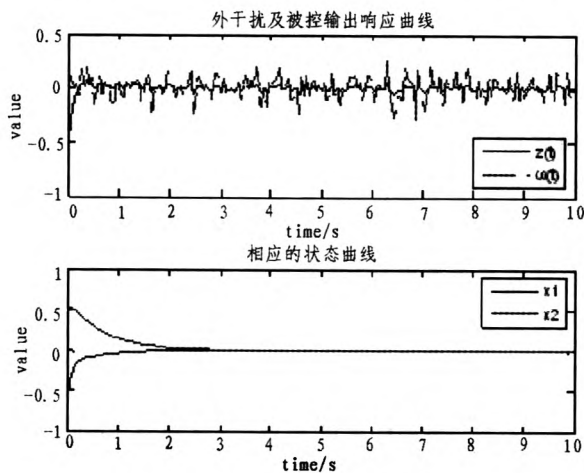


图2 干扰条件下系统状态与输出曲线  
Fig.2 Responds of system states & outputs with disturb

针对不同的执行器故障情况,设计  $H_\infty$  的鲁棒保代价控制律都能保证闭环系统的稳定性,且使系统具有一定的干扰抑制能力。

## 4 结论

研究了一类参数不确定时滞系统的  $H_\infty$  保代价控制问题,通过 Lyapunov 稳定性理论分析推导出使系统  $H_\infty$  保代价控制器存在的充分条件,并给出了利于计算的相应 LMI 形式。设计的控制器能够保证系统的鲁棒容错性,且使系统存在保成本上界也具有指定  $H_\infty$  范数的干扰抑制能力。最后给出的数值例子说明此方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 贾英民. 鲁棒  $H_\infty$  控制[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [3] YANG Guang-hong. Reliable  $H_\infty$  control of linear systems with adaptive mechanism[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(1):242-247.
- [4] Adams R J, Buffington J M, Sparks A G, et al. Robust multivariable flight control [C]//London, U.K.:Spring-Verlag, 1994.
- [5] 王德进. 线性不确定时滞系统鲁棒保代价/ $H_\infty$ 混合控制[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2003, 20(4):32-34.  
WANG De-jin. Robust guaranteed cost control /  $H_\infty$  control for linear uncertain time-delay systems[J]. Natural Science Journal of Heilongjiang University, 2003, 20(4):32-34.
- [6] 滕青芳. 不确定时滞系统的保代价  $H_\infty$  可靠控制[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(12):245-248.  
TENG Qing-fang. Guaranteed cost  $H_\infty$  control for linear uncertain time-delay systems[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(12):245-248.
- [7] Yang G H, Wang J L, Soh Y C. Reliable controller design for linear systems with sensor failures[J]. Conference on Decision & Control, 1998.
- [8] JIN Xiao-zheng. Robust adaptive fault-tolerant compensation control with actuator failures and bounded disturbances [J]. Acta Automatica Sinica, 2009, 3(35):305-309.

(上接第154页)

- vehicle electronic diagnostic system based on AUTOSAR[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(2):179-183.
- [6] Kum D, Park G-M, Lee S-H, et al. AUTOSAR migration from existing automotive software [C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, 2008:558-562.

- [7] 阴晓峰, 刘武东. 汽车电子系统软件开发新标准AUTOSAR[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2010, 29(2):102-106.  
YIN Xiao-feng, LIU Wu-dong. AUTOSAR-a new standard of software development for automotive electronic systems [J]. Journal of Xihua University: Natural Science, 2010, 29(2):102-106.