

采用模块化思想的汽车电器智能化设计方法

陆良¹, 杨殿阁¹, 顾铮珉¹, 张新丰², 连小珉¹

(1. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 100084, 北京; 2. 同济大学汽车学院, 201804, 上海)

摘要: 为了提高整车传统电器智能化设计的工作效率, 提出一种基于模块化思想的汽车电器智能化设计方法. 将控制器的硬件电路和软件算法分解为一系列标准模块, 将模块按所设计的结构进行合理组合, 即可完成各种电器控制器软硬件的设计. 利用该方法完成了某大客车传统电气系统的智能化改造, 应用模块化的设计方法, 显著简化了标准化控制器软硬件的开发过程, 大大减少了设计和调试的工作量, 与传统设计方法相比, 缩短了整车控制器的开发周期约 50%. 实车验证表明, 控制器硬件结构简单、清晰, 软件算法具有很好的一致性和规范性.

关键词: 汽车智能电器系统; 控制器设计; 模块化

中图分类号: U463.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0111-05

Designing Strategy for Smart Vehicle Electrical/Electronic Devices Based on Modularization

LU Liang¹, YANG Diange¹, GU Zhengmin¹, Zhang Xinfeng², LIAN Xiaomin¹

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. School of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To improve the efficiency of intelligentization design process for all electrical devices in a vehicle, a strategy for smart vehicle electrical/electronic devices based on modularization is proposed. The controllers are decomposed into a number of standard hardware and software modules. Appropriately combining the modules according to the schemed structures, controllers for variant types of electrical/electronic devices are designed. The traditional electrical system of an experiment bus is converted into a smart electrical/electronic device system following the strategy, which simplifies and standardizes the design process for both controller hardware and software significantly, reduces the controller design and debugging tasks abundantly, and shortens the development period by 50% compared with the traditional designs.

Keywords: smart vehicle electrical/electronic system; controller design; modularization

近年来, 汽车电子技术快速发展, 具有数字化通信功能的器件已经成为汽车智能化电器的发展趋势^[1], 汽车电器的集成化和模块化也已经成为一个重要发展方向^[2]. 然而, 由于整车电器种类繁多, 且不同电器的功能要求、控制方式、负载特性相异, 对传统电气系统进行智能化设计的工作量较为庞大, 因此目前还没有一种对整车所有传统电器普适的设计标准和方法. 电器的智能化设计一般由多个供应商分别完成, 因此造成了大量的重复工作.

本文对一辆具有传统电气系统的大客车进行研究, 提出了一种基于模块化思想的汽车电器智能化设计方法, 目的在于研究一种对全车所有传统电器通用的智能化设计方法, 以减少设计工作量, 实现控制器软硬件的重用性、通用性, 以及设计的标准化.

1 电器智能化的系统规划

试验车的智能化改造目标为实现汽车智能电器系统(SEED), 即一种以车载总线为基础的彻底全

分布式电器系统^[3]. 全车所有电器均实现网络化和智能化,为独立的网络节点,电器连接关系规范、简洁,其电器拓扑如图1所示. 智能化设计通过为原电器添加控制器实现,控制器的外部连接关系如图2所示,其中骨干网络和局域网络的不变线束见文献[4].

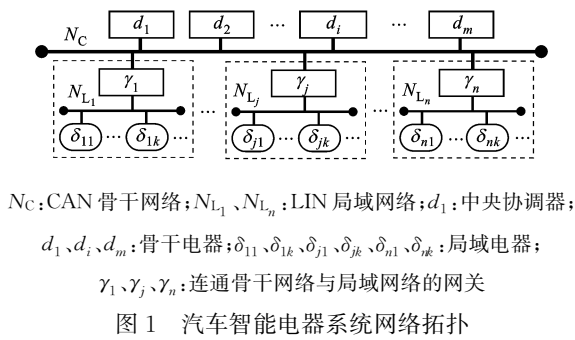


图1 汽车智能电器系统网络拓扑

态进行接收和判断,电器之间相对独立,如图4所示. d_i (d_1 除外)发送自己的状态信息 m_{bi} 到 N_C ; δ_{jk} 发出自己的状态信息 b_{jk} 到 N_{Lj} ,由 γ_j 整合为状态信息集 M_{bj} 再转发到 N_C . d_1 接收所有其他 d_i 及 γ_j 的状态信息集合 M_B 进行协调,生成控制指令集 M_A 并发出. d_i 接收 M_A 中的某个信息帧,提取相关的指令并执行. γ_j 接收 M_A 中的若干条信息帧,转换成控制指令子集 M_{aj} 转发到局域网, δ_{jk} 接收 M_{aj} 中的某个信息帧,获取指令并执行.

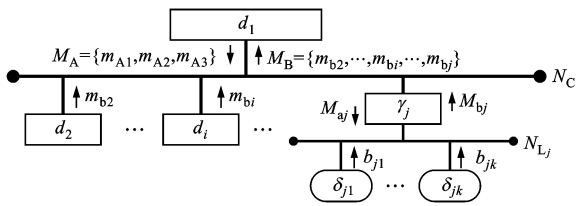


图4 指令化控制工作方式

智能电器的指令化控制算法包括下行算法和上行算法,下行算法用于指令的获取与执行,上行算法用于状态的获取与发送. 指令执行算法包括 I/O 输出、D/A 输出、SCI 输出等模块,状态获取算法包括 I/O 采集、A/D 采样、I/C 采集、SCI 输入等模块,所有这些模块都是功能简单、易于开发的算法程序,可以作为独立函数供其他算法模块和主程序调用.

2 智能化控制器的结构设计

智能化控制器的结构包括硬件电路结构和软件算法结构,控制器 $U_d = \{U_H, U_S\}$,其中 U_H 为控制器硬件电路, U_S 为控制器软件算法.

2.1 控制器硬件结构

控制器硬件电路 $U_H = \{M_d, R_d\}$,其中 M_d 为控制器的电路模块集, R_d 为电路模块之间的连接关系描述集. 控制器硬件电路由电路模块“无缝”拼接而成,除此之外没有任何其他的元器件. 控制器的模块集 $M_d = \{X_i | i = 1, 2, \dots, X(d)\}$,其中 X_i 表示不同的模块, $X(d)$ 为 M_d 集合中的元素数. 在图5中,通用模块 F 、 P 、 C/L 与 z_B 直接连接(在没有强电保护模块的控制器中, F 不存在),简单电器的控制器只有一个执行模块,而复杂电器的控制器则有多个执行模块.

如图5所示,电路模块之间通过模块接口实现连接,具有相同电气信号定义的模块接口可以进行连接. 模块接口分为物理接口和虚拟接口,物理接口采用接插件的形式,可分离,记做 J_i ;虚拟接口采用

1.1 控制器硬件模块化设计

如图3所示,根据电器的工作要求,在控制器中设计一个或多个执行模块,同时根据电器类型选择性使用强电保护模块.

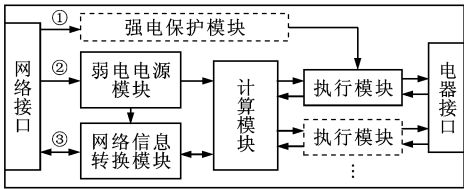
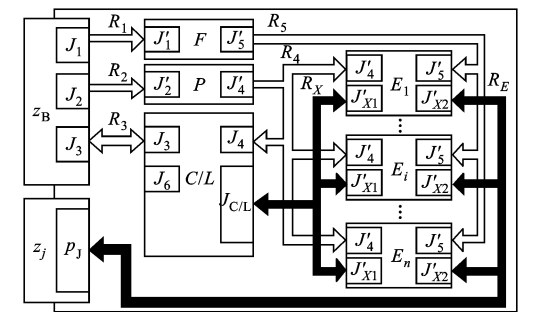


图3 控制器的硬件电路

控制器的电路模块分为通用模块和执行模块,通用模块实现控制器通信、计算、供电及供电保护,包括骨干/局域网通信计算模块 C/L ,弱电/强电电源模块 P/F . 执行模块实现电器驱动、故障诊断、状态读取等具体功能,包括电阻类/电机类驱动模块 D/M 、接电/接地输出模块 H/G 、开关传感器模块 S 等.

1.2 指令化控制算法的模块化设计

在智能电器系统中,专门设计 d_1 用于集中协调各电器之间的控制和约束关系,而智能电器只需要执行针对它本身的控制指令,无需对其他电器的状



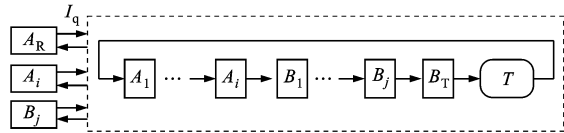
z_B :网络接口; z_j :电器接口; E_i :执行模块; J_j/J'_j :模块接口

图 5 模块化的控制器硬件结构

芯片引脚、印制电路引线等形式,一旦制作完成则物理上不可分离,记做 J'_j . 控制器的模块连接关系 $R_d = \{R_X, R_E, R_i | i=1, 2, \dots, 5\}$, 其中, R_X 用于描述计算模块 C/L 与执行模块 E_i 之间的连接; R_E 用于描述执行模块 E_i 与电器接口 z_j 的连接; $R_i | i=1, 2, \dots, 5$ 用于描述 P, F 的电源信号连接及 C/L 的网络信号连接(在没有 F 的控制器中,连接关系 R_1 和 R_5 不存在).

2.2 指令化控制算法结构

控制器软件算法 $U_s = \{A_s, B_s\}$, 其中 A_s 为下行算法集, $A_s = \{A_R, A_i | i=1, 2, \dots, A(d)\}$, $A(d)$ 为指令执行算法的个数. B_s 为上行算法集, $B_s = \{B_T, B_j | j=1, 2, \dots, B(d)\}$. 智能电器系统实现了指令化的控制方式,但单个智能电器的功能较为简单,因此将算法结构选用带有中断的轮转结构^[5],如图 6 所示.



I_q :总线信息帧; A_R :指令获取算法模块; A_i :指令执行算法模块;

B_T :状态发送算法模块; B_j :状态采集算法模块; T :周期控制模块

图 6 控制器算法结构

控制器算法程序包括中断程序和前台主程序,指令接收算法在中断程序中完成,每次到达一个信息帧,则总线信息帧中断发生一次. 指令执行算法模块、状态采集算法模块根据实际所采用的输出和采集方式,在前台主程序或者中断程序中完成, B_T 在前台主程序中完成,并由 T 来保证程序的周期性轮转运行.

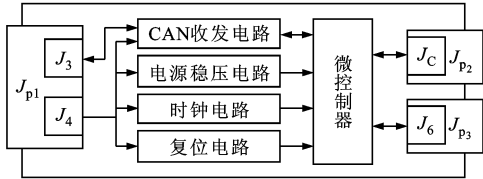
3 实车控制器的设计开发

应用模块化的设计方法,来完成某大型客车整车所有传统电器的智能化改造,其过程为:首先对所

有的电路模块和算法模块进行详细设计,包括 16 个硬件电路模块和 9 个软件算法模块;然后根据电器的不同类型,选择恰当的电路模块和算法模块进行组合,完成控制器的软硬件设计.

3.1 模块的具体设计

3.1.1 电路模块的具体设计 电路模块 $X = \{J_X, C_X\}$, 其中 J_X 为模块的接口集, C_X 为模块的电路集, C_X 中所有的子电路均为简单常用的典型电路. 以电路模块 C 为例,其内部结构如图 7 所示,其接口集 J_C 包括 $J_{p1} \sim J_{p3}$ 3 个接插件.



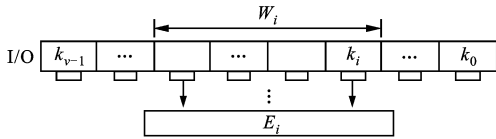
J_4 :微控制器工作电源接口; J_3 :通信接口; J_C :数字接口(包括

I/O 端口, AD/DA 端口等); J_6 :调试接口

图 7 电路模块内部的结构图

3.1.2 算法模块的具体设计 控制器的算法应用前后台嵌入式系统结构,每一个算法模块都是一段软件算法程序,可以作为独立的函数供主程序及其他算法模块调用.

以下行算法模块 I/O 输出为例,利用计算模块 C/L 的 I/O 端口对执行模块进行控制. 选定 C/L 所具有的 I/O 端口且固定几个用于 I/O 输出. 执行模块与 C/L 的 I/O 端口连接关系如图 8 所示.



E_i :执行模块; W :I/O 端口的个数; k_0, k_i ,

k_{v-1} : C/L 所具有的 I/O 端口

图 8 执行模块与 I/O 端口的连接

对于一个控制指令 x_i , 所控制的 I/O 端口为从 k_i 开始的连续 W 个端口, 将连接端口的位向量定义为 $p_i = (k_i, k_i + 1, \dots, k_i + W - 1)$, x_i 共有 J_i 个指令值, $x_i \in [0, J_i - 1]$.

当 x_i 只控制一个电路模块时, I/O 输出算法模块对 D, M, H, G 的控制矩阵分别定义为 Q_D, Q_M, Q_H 和 Q_G , 如表 1 所示. 控制 D, H, G 所需操作的 I/O 端口为 k_i , 当 $k_i = 0$ 时, 表示电器关闭, 当 $k_i = 1$ 时, 表示电器打开. 控制 M 所需操作的 I/O 端口为 k_i, k_{i+1} , 当 $k_i = 0$ 时, 表示电器正转, 当 $k_{i+1} = 0$ 时,

表示电器反转. 当 $k_i, k_{i+1}=1$ 时, 电器关闭. 当 x_i 对多个模块同时进行控制时, 则控制矩阵需要相应地进行组合. 控制器的控制矩阵由所有执行模块的控制矩阵组成, 同样, 控制器的状态矩阵由所有执行模块的状态矩阵组成.

表 1 模块的控制矩阵

Q_D		Q_M			Q_H		Q_G	
x_i	k_i	x_i	k_i	k_{i+1}	x_i	k_i	x_i	k_i
0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	1	0	1	0
2	1	2	1	0	2	1	2	1
3	1	3	1	1	3	1	3	1

3.2 实车控制器的设计

试验车在改造前共有 78 个传统电器, 可分为 25 类. 不同类型电器的控制器设计过程相同, 下面以空调面板控制器 d_{13} 为例, 来叙述具体的设计过程.

3.2.1 控制器硬件电路 d_{13} 要求实现的功能包括空调面板供电, 以及采集空调对发动机请求信号的功能. 所设计的控制器硬件结构如图 9 所示, D 用于空调面板供电, S 用于采集空调对发动机的请求信号, 模块数 $X(d_{13})=5, M_d=\{C, P, F, D, S\}, R_d=\{R_X, R_E, R_i | i=1, 2, \cdots, 5\}$, 其中 R_X 包括 C 的 I/O 端口 k_0, k_1, k_2 与 D, S 之间的连接描述, R_E 包括 D, S 与 z_j 的端子 $p_1 \sim p_3$ 之间的连接描述.

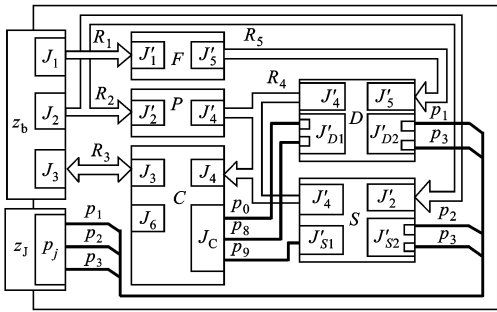


图 9 空调面板的控制器结构

3.2.2 控制器指令算法 如图 10 所示, 其中 A_1 用于空调面板供电, B_1 用于供电故障诊断, B_2 用于采集空调信息, B_T 用于状态发送. 各个算法模块具体的算法名称以及对应的参数集定义如表 2 所示.

在 A_s 中, A_R 获取 d_1 发出的信息帧 m_{A1} , 提取钥匙档位指令 x_1 ; A_1 的控制指令为 x_1 , 其 I/O 输出算法模块所操作的端口为 k_0 , 控制矩阵 $Q_1=Q_D$ (见表 3). 在 B_s 中, B_T 发送空调面板状态信息 m_{b13} , B_1

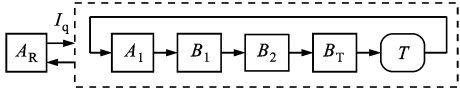


图 10 空调面板控制器算法结构图

表 2 空调面板控制器算法模块及参数定义

序号	算法集	算法	算法名称	参数集
1	A_s	A_R	指令获取	m_{A1}
2		A_1	I/O 输出	x_1, k_0, Q_1
3	B_s	B_T	状态发送	m_{b13}
4		B_1	I/O 采集	y_1, k_0, R_1
5		B_2	I/O 采集	y_2, k_2, R_2

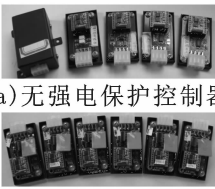
采集供电诊断信息 y_1 , I/O 采集算法模块的操作端口为 k_0 和 k_1 , 状态矩阵 $R_1=R_D$. B_2 采集空调请求信息 y_2 , I/O 采集算法模块所操作的端口为 k_2 , 状态矩阵 $R_2=R_S$. R_D, R_S 分别为 I/O 采集算法模块对应 D, S 的状态矩阵.

表 3 空调面板控制器的控制矩阵与状态矩阵

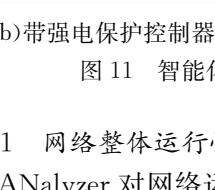
Q_1		R_1			R_2	
x_1	k_0	k_0	k_1	y_1	k_2	y_2
0	1	0	0	0	0	1
1	0	0	1	2	1	0
2	1	1	0	0		
3	1	1	1	3		

3.3 实车应用与验证结果

按照模块化的设计方法对试验车的所有传统电器进行智能化设计, 图 11 为智能电器系统的控制器实物及试验车.



(a) 无强电保护控制器



(b) 带强电保护控制器



(c) 试验车道路测试现场

图 11 智能化控制器的实车验证

3.3.1 网络整体运行性能验证 在试验过程中, 使用 CANalyzer 对网络运行状况进行监测, 时间约为 100 h. 网络无错误帧, 锁车状态下负载率 l_d 小于 0.5%, 工作状态下 l_d 约为 10%, 如图 12 所示. 网络保持较低的负载率, 有利于系统的稳定性和拓展性.

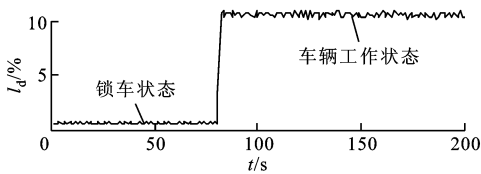


图 12 骨干网络负载率曲线

3.3.2 网络实时性验证 由于存在通信与计算的延时,电器的指令响应存在一定的滞后.利用示波器对电器的实际响应时间进行测试,结果表明响应时间符合设计要求.部分电器的测试结果如表 4 所示.

表 4 电器响应时间的测试结果

测试工况	响应时间/ms	
	实测平均值	设计最大值
油门踏板响应	17.8	40
制动灯亮	89.9	200
传感器故障报警	96.6	200
远/近光灯亮	95.3	200

3.3.3 控制器可靠性验证 试验车在试车场内和非高峰期路况较好的市内公路进行道路测试,在表 5 所设计的电器测试工况下行驶了 1 km.试验结果表明,智能化改造后的电器功能完善,控制器工作稳定可靠.

表 5 试验车道路的电器测试工况设计

测试工况	测试电器个数	测试工况	测试电器个数
日常行使	52	冬天行驶	58
夜晚行驶	70	夏天行驶	55
雨天行驶	54	停车维修	54
雾天行驶	55	锁车状态	3
冬天雨夜行驶	74	冬天雾夜行驶	77

3.3.4 整车控制器设计工作量统计 对整车的传统电器进行控制器设计时,传统设计方法与模块化设计方法所需的工作量如表 6 所示,使用模块化的设计方法能够大大减少控制器设计与调试的工作量,使开发周期缩短约 50%.

4 结 论

本文提出了一种基于模块化思想的汽车电器智能化设计方法.基于对整车电器的功能分析,设计控制器软硬件结构,将控制器硬件和软件分解为标准

表 6 整车控制器设计的工作量统计与比较

设计方法	设计环节	平均工作量* /d	数量 /个	工作量* /d	总时间 /d
传统	控制器硬件设计与调试	2	25	50	125
	控制器算法设计与调试	3	25	75	
模块化	电路模块设计与调试	2.0	16	32.0	62.5
	算法模块设计与调试	2.0	9	18.0	
	控制器模块组合	0.5	25	12.5	

* :表示每天每人的工作量.

模块,完成了每一个模块的具体设计,并利用这些模块进行合理组合,完成了试验车所有传统电器的智能化设计.经实车验证,本文方法有效可行,能大大减少控制器软硬件的设计和调试工作量,可缩短控制器 50%的开发周期.

参考文献:

[1] WENDORFF W V. Communication is the base of to-morrows highly reliable automobile electronics [J]. SAE Transactions: Journal of Passenger Cars-Electronic-Electric System, 2002(1):336-341.

[2] 钱菊根. 国内外汽车电器发展趋势 [J]. 江苏电器, 2008(7):1-2.

QIAN Jugen. Automotive electrical appliances development trend both at home and abroad [J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2008(7):1-2.

[3] ZHANG feng, YANG Diange, LIAN Xiaomin, et al. IEED system; a new kind of automotive electrical system [C]// Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008.

[4] 张新丰, 杨殿阁, 薛雯, 等. 汽车电器不变线束连接系统 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 281-284.

ZHANG Xinfeng, YANG Diange, XUE Wen, et al. Invariant wiring harness for vehicle electrical device connection [J]. J Tsinghua Univ (Sci and Tech), 2009, 49(2):281-284.

[5] KAMAL R. Embedded systems architecture, programming and design [M]. New York, USA: McGraw-Hill Companies, 2004: 25.

(编辑 管咏梅)