

汽车车身电器系统组网优化方法

张新丰¹, 连小珉², 杨殿阁²

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

摘要: 基于全分布式汽车车身电器系统, 提出了一种基于有序样品聚类分析的局域网组网优化方法. 首先给出了全分布式汽车车身结构及局域网连接方法; 然后将组网优化问题转化为有序样品的有限容量聚类问题, 并建立了局域网组网优化模型, 通过可行解空间全局搜索方法给出了该问题的求解算法; 最后将该组网优化方法用于某国产公交客车的车身电器系统的全分布式设计, 证明这种方法是可行的.

关键词: 全分布式; 车身电器; 车载网络; 聚类分析; 组网优化

中图分类号: TN913.3

文献标志码: A

Networking Optimization for Automotive Body Electrical System

ZHANG Xinfeng¹, LIAN Xiaomin², YANG Diange²

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

Abstract: An ordered-specimen cluster analysis-based optimization method is proposed on the basis of a completely distributed body electrical system. First, the architecture of such system and the connection method are described. Then, the optimization problem is converted to the ordered-specimen cluster with limited-capacity problem by taking into consideration of the network schedulable condition, and the optimization model is setup. Finally, the model's solver algorithm is also proposed by the global search method. The optimization method is applied to a distributed body electrical system of one indigenous bus and is proved to be feasible.

Key words: completely distributed control system; automotive body electrical system; in-vehicle network; cluster analysis; networking optimization

变得越来越复杂, 车载总线技术和以微控制器技术为基础的嵌入式控制系统是现代汽车电子电器系统的发展趋势^[1]. 飞思卡尔、恩智浦和沃尔沃等公司都提出了自己的汽车电器系统结构^[2-4], 斯堪尼亚卡车采用了基于三个 CAN 网络的结构^[5], 大陆汽车采用了仪表总线 (I-CAN)、诊断总线 (D-CAN)、动力总线 (P-CAN) 和多路总线 (M-CAN) 结构. 沃尔沃公司提出了一种更加分布式的汽车电器系统, 用于 B9/B12 平台汽车上^[6]. 典型的汽车电器系统, 其分布程度及发展趋势如图 1 所示.

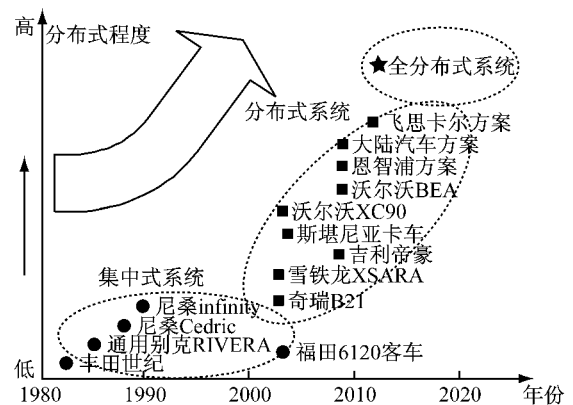


图 1 汽车电器系统分布控制发展趋势

Fig.1 Trend of automotive distributed electrical system

集成专用控制器的智能汽车电器, 如智能传感器、智能执行器和智能总成^[7-11]等, 在汽车中开始应用. 智能汽车电器是在原有汽车电器上, 添加微控制器实现自动控制或数字化的信号通信, 智能化器件具有以下优势: ①具备数字化通信接口, 便于组成网络; ②适用于分布式测量和控制, 简化系统设计^[12-13].

本文针对汽车车身电器系统分布不规则、布线困难等问题, 根据全分布式车身电子电器系统的结构特征, 采用有序样品聚类方法, 对局域网组网进行

随着汽车电子电器的发展, 汽车电子电器系统

收稿日期: 2011-07-09

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20110072120001); 汽车安全与节能国家重点实验室(KF1092)

第一作者: 张新丰(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为汽车电子、新能源远程监控系统、智能交通及信息技术.

E-mail: zhangxinfeng@tongji.edu.cn

优化,并开发了原型样车,证明了该方法的可行性.

1 全分布式车身电子系统的电器组网

全分布式车身电器系统,包括骨干网、局域网及电源网,车身电器通过上述三个网络连接,其结构如图 2 所示^[14].每个局域网,包含一组电器 G_i 和一个网关 γ_i .

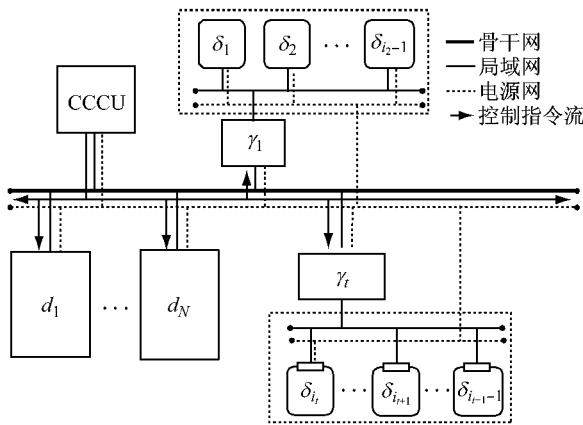


图 2 全分布式汽车电器系统框架^[14]

Fig.2 Layout of completely distributed electrical system

全分布式汽车电器系统中引入了用于给所有电器供电的电源网.电源网由多个独立的“电源通道”构成,为所连接的电器提供电源并且在汽车停机状态下控制静态电源消耗;监控蓄电池状态,以减小蓄电池因长期电力消耗导致亏电的可能性;检测通道上的电流,当电流超过合理范围时关闭通道以达到整车安全用电目的.

中央协调器(图 2 中 CCCU)用于执行整车车身电器系统的控制逻辑,协调整车电器正常工作.由于中央协调器的存在,全电子系统中的电器只保留最基本的控制和诊断功能,这样大大降低了单个智能节点的计算需求,并且能与其他电器实现逻辑和控制上的独立^[15].

与骨干网直接相连的称为骨干电器(图 2 中 d_i),一般而言,满足以下原则的电器被列为骨干电器:①与安全相关较大的电器;②与网络交换信息较多或时效性要求比较高的电器.其余的电器均被列为局域电器(图 2 中 δ_i).骨干电器与局域电器均为智能电器,其特征是控制器与电器集成在一起,并具有标准的数字信号接口,其原型样机如图 3 所示.

全分布式车身电器系统的线束连接,分为骨干网线束、局域网线束和电源网线束三种.局域电器组成的局域网使用局域网线束连接,局域网线束具有

标准化的结构,如图 4 所示^[16].

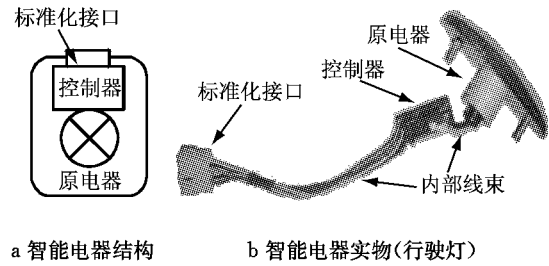


图 3 智能电器结构及样机

Fig.3 Intelligent electrical device structure and demo

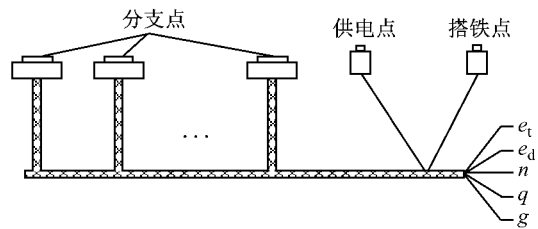


图 4 局域网线束^[16]

Fig.4 Local network harness

$$W = (e_t, e_d, n, q, g) \tag{1}$$

局域网线束的干线和分支中均包括 LIN 信号 n ,弱电电源线 e_t , e_d 及强电电源线 q 和 g .

在全分布式车身电器系统中,骨干网线束和局域网线束均具有固定的电气信号定义和干线-分支结构,因此全分布式车身电器系统的线束大大简化,成本也大大降低,通过对局域网电器组优化,可进一步简化线束连接.

2 组网优化方法及其求解

2.1 局域网电器空间位置

2.1.1 骨干线束

汽车骨干线束的布置受到机械结构的约束,一般情况下骨干线束通过汽车车身的走线槽、走线孔、定位卡等结构,贯穿整个车身.典型的汽车骨干线束布置如图 5 所示.其中 a 图为客车骨干线束的 U 型和 L 型布置,b 图为乘用车经常使用的 H 型和 E 型布置.

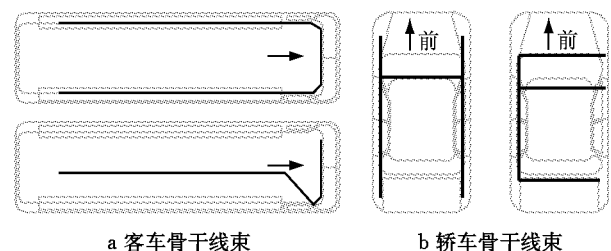


图 5 汽车骨干线束的典型布置

Fig.5 Typical backbone harness layout on

2.1.2 电器的空间降维排序

将骨干线束由头到尾“拉直”作为 x 轴,并在一端定义零点,干线上的分支 $Y_i, i=1,2,\dots$,保持与干线垂直.在根据骨干线束定义的直角坐标系中,由于车身电器通过电器分支与骨干线束相连,因此车身电器的空间位置可以由其中骨干线束上的投影点替代,如图 6 所示.

如图 6 所示, $\delta_1, \delta_2, \delta_i$ 的空间位置坐标分别可由分支点 a_1, a_2, a_i 在骨干线束坐标系中的坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_i, y_i)$ 来表示.

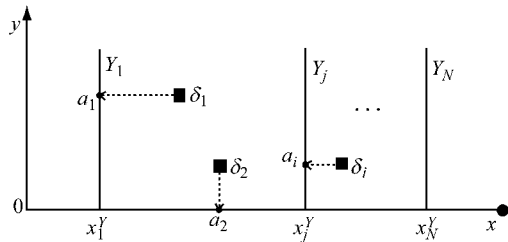


图 6 骨干线束坐标系及电器位置坐标

Fig.6 Electrical device coordinator on backbone harness coordinate system

电器是以骨干线束干线上的投影点(图 6 中的 a_2)替代还是支线上投影点(图 6 中的 a_1)替代,取决于电器(点)到骨干线束(干线和支线)的距离,应以最小距离的投影点进行替代.

如果将电器按位置坐标大小进行排列,先按 x 坐标从小到大排列,当 x 坐标相等的时候按 y 坐标由小到大排列,得到电器按坐标排列的有序列为

$$\Delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\} \quad (2)$$

对于上式中的任意 $\delta_i, \delta_j \in \Delta$ 有

$$i < j : x_i \leq x_j, y_i \leq y_j \quad (3)$$

2.2 优化模型建立

2.2.1 线束距离定义

电器 δ_i 与 δ_j 之间的线束距离定义为

$$d(i, j) = \begin{cases} |x_i - x_j| + |y_i - y_j|, & x_i \neq x_j \\ |y_i - y_j|, & x_i = x_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 分别为电器在骨干线束总线坐标系中的坐标.线束距离具有明确的物理意义,即在可布线空间的约束条件下,从电器 δ_i 到 δ_j 需要的不变线束长度.

2.2.2 网络可调度约束条件

对任一局域网,网络中传输的信号包括用于对电器进行控制的控制指令信号和电器输出的状态信号.由全分布式系统结构可知,对任意一个局域网,其中的控制指令帧都相同.状态信号包括传感信号、故障信号等,是由电器发给网关,再转发到骨干网

上.不同类型的电器,具有不同的信号定义和不同的信息量,因此状态信号所占用的长度也不相同.以典型的车身电子控制系统为例,将车身电器按负载类型进行分类,每种电器对控制信号及状态输出的需求和数量如表 1 所示.

表 1 车身电器分类及信号需求

Tab.1 Electrical device classification and signal requirement

基本电器件	状态信号定义	
	信号类型	长度/bit
电阻性负载	诊断信号	2
电机负载	诊断信号	2
开关器	传感信号	2
电阻型传感器	传感信号	8
电压输出型传感器	传感信号	8
频率输出型传感器	传感信号	8

一般来说,传感器信号都是周期型信号,故障信号可以是事件型信号,为方便设计起见,可以将它们都设置成周期型信号.周期型信号的发送周期则需要根据具体电器对实效性的要求不同而定义,一般车身电器系统中,信号的传输周期为 100~1 000 ms.

对于所有的电器,其控制指令都根据汽车总线(如 LIN 总线)的特点在应用层编码,然后打包在若干帧里面,对于电器输出的状态信号,则至少需要一帧,而在 LIN 规范中,又要求其长度为偶数,因此电器状态信号最后成帧的数据部分长度

$$N_i = 2 \lceil \lceil l_i / 8 \rceil / 2 \rceil \quad (5)$$

式中: l_i 为电器 δ_i 的信号长,bit; N_i 为电器 δ_i 的信号帧长度,byte.

LIN 消息在总线上的传播时间由三部分构成:帧头、响应间隔和响应^[17].因此消息的传播时间

$$\tau(n) = 1.4 [34\tau_{\text{bit}} + 10(n+1)\tau_{\text{bit}}] \quad (6)$$

式中: τ_{bit} 是在给定波特率下每一位传输所需时间, n 是消息长度.不同波特率下,不同长度的 LIN 消息传输所用时间如表 2 所示^[18].

表 2 不同波特率下 LIN 信号传输时间

Tab.2 Transfer time per frame with different lengths

波特率/bps	ms			
	2 byte	4 byte	6 byte	8 byte
19 200	4.7	6.1	7.6	9.0
9 600	9.3	12.3	15.2	18.1
4 800	18.2	24.6	30.4	36.2

对于 LIN 总线来说, LIN 总线负载率小于 100%才能满足调度条件,因此子网可调度条件为

$$\frac{\tau(N_c)}{T_c} + \sum_{i \in [i_2, i_{i+1}-1]} \frac{\tau(N_i)}{T_i} < 1 \quad (7)$$

式中: N_i 为电器 δ_i 发出的消息帧的长度; T_i 为与该消息对应的周期; N_c, T_c 为中央协调器发出的控制指令帧长度及相应的周期。

2.2.3 有序样品的有限容量聚类模型

通过对电器进行排序, 将局域网组网的问题转化为 n 个电器划分成 m 个类的问题, 即有序样品的聚类分析问题。

对于第 t 组 $G_t, t=1, 2, \dots, m$, 定义其直径

$$D_t = \max(d(i_t, i_{t+1}) - 1) \quad (8)$$

式中: $d(i_t, i_{t+1}) - 1$ 为电器间距离, 其长度由式(4)定义, 定义分类的损失函数

$$L(b(n, m)) = \sum_{t=1}^m D_t \quad (9)$$

式中: $b(n, m)$ 为对 n 个样本进行 m 类划分的方法, 直径 D_t 实际上就是每组电器组网所需的线束长度, 损失函数为所有局域网线束总长度. 对电器的组网问题, 就转化为求解一种分割方法 $b(n, m)$, 使得损失函数 L 最小。

根据上述, 局域网组网的优化模型可描述为

$$\begin{aligned} \min L(b(n, m)) &= \sum_{t=1}^m D_t \\ \text{s. t. } \frac{\tau(N_c)}{T_c} + \sum_{i \in [i_t, i_{t+1}-1]} \frac{\tau(N_i)}{T_i} &< 1, \\ t &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 最优分组求解

由于式(10)所描述的优化模型带有约束条件, 约束条件表明对该有序电器序列进行分割时, 类内部元素的个数及其某属性总和不能超过一定容量, 因此无法采用一般的聚类方法. 考虑到解的离散性及问题的规模, 采用全局搜索方法, 根据 LIN 协议的规定, LIN 网络的控制器数量一般不能超过 16 个, 而少于 4 个电器组成的网络则没有意义, 记 i_t 为第 t 组最后一个电器编号, 总分组数(即网络数)为 m , 则根据网络内电器数量的限制, 可在多维整数空间 B 中进行搜索。

$$B = \begin{cases} 4 < i_1 < 16 \\ \vdots \\ i_{t-1} + 4 < i_t < \min[(i_{t-1} + 16), n - 4] \\ \vdots \\ i_m = n \end{cases} \quad (11)$$

式中: n 为电器数量. 在网络负载“平均”分配的理想情况下, 网络数 m 可由下式求得

$$m = \max\left(\lceil n/15 \rceil, \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\tau(N_i)}{T_i}}{\left(1 - \frac{\tau(N_c)}{T_c}\right)} \right\rceil\right) \quad (12)$$

事实上, 由于网络负载分配并不按有序样品序列均匀分配, 因此最终可行的网络数 m 比式(12)计算的要多. 由于每个分割点最多搜索 12 次, 网络数 $15 < m < n/4$, 该算法的时间复杂度

$$T(n) \propto \left(\frac{12n}{m}\right)^m \quad (13)$$

汽车内部电器数量总是十分有限的, 大概在 100 左右, 不会超过 200, 因此搜索范围并不是很大, 因此利用该算法进行数值求解完全可行. 最终其算法流程如图 7 所示。

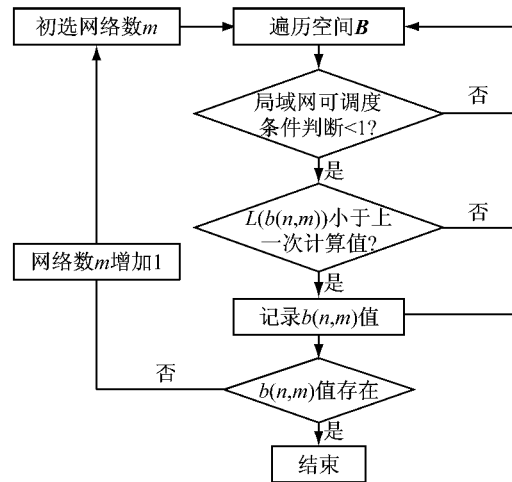


图 7 有序样品的有限容量最优聚类求解计算流程
Fig.7 Ordered specimen with limited volume clustering solution algorithm

第 1 步: 算法启动, 根据式(12), 计算初始网络数 m .

第 2 步: 遍历搜索空间 B , 针对每个分法判断网络可调度条件并求解损失函数 $L(b(n, m))$, 这里初始损失函数 L 的值可取 $d(1, n)$.

第 3 步: 如果记录值 $b(n, m)$ 存在, 则该值为最优解。

第 4 步: 如果记录为空, 则令 $m = m + 1$, 重复第 2 和第 3 步过程, 直到求得满足条件的解。

3 组网优化方法验证与应用

本文所开发的原型样车为某国产 12 m 长大型公交客车, 其原车身电器系统为点对点连接的电气系统, 通过对其实行全分布式改造, 并利用局域网组网优化方法进行优化。

3.1 车身局域网电器及空间分布

原型样车的车身电器配置如表 3 所示。

累计电器多达 70 余个, 其在空间上的分布如图 8 所示。

表3 原型样车原车身体电器

类别	原电器
电源系统	蓄电池,发电机
照明与指示系统	侧标志灯,前组合灯,前雾灯,侧转向灯,后组合灯,后雾灯,高位刹车灯,示廓灯,路牌灯,门灯,发动机舱灯,司机灯,通道灯,机油指示板
辅助电器	雨刮器,洗涤器,除霜器,电喇叭,监视器,下车提示器,倒车蜂鸣器,集中润滑器,干燥器
空调及供暖系统	空调系统,加热器,散热器,换气扇
仪表系统及操控相关电器	组合仪表,组合开关,水温传感器,车速传感器,转速传感器,机油压力传感器,油量传感器,车门状态开关,接近开关,驻车刹车开关,倒车空档开关,气压报警开关,下车请求开关,水位报警开关

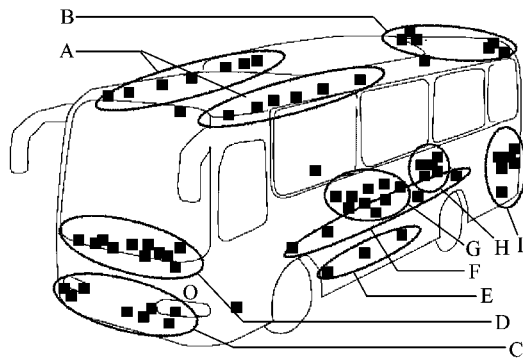


图8 客车车身电器系统的分布

Fig.8 Electrical device distribution on prototype bus

图8所示的车身体电器分布在车顶(A)、车尾(B)、车前(C,D)、车外左右(E)、车内部地板(F)、底盘(G)、车右侧电平舱(H)及车尾部(I)等区域。客车身电器分布的主要特点是:①空间分布广泛,从车尾到车头、车内到车外、车顶到底盘都有;②分区特征并不十分明显。因此将车身体电器利用局域网组网有许多方案,需要进行优化。

3.2 局域网组网优化方案

首先根据该客车所能布线的空间,给出干线线束的布置,根据干线线束,将车身体电器按第2.1节所述的映射方法,进行降维排序,并利用上述组网优化方法进行局域网划分,当划分网络数分别为6和7时,最终优化结果如表4所示。

表4 局域网组网优化结果

局域网	参数	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	G ₆	G ₇
6个局域网	电器数	11	14	14	9	7	15	—
	线束长/m	5.7	4.7	6.0	0.3	1.4	6.1	—
	负载率/%	42.6	44.9	96.7	69.4	92.6	62.5	—
7个局域网	电器数	11	11	13	5	9	7	15
	线束长/m	5.7	3.4	3.8	0.7	0.3	1.4	6.1
	负载率/%	42.6	42.6	43.7	91.5	69.4	92.6	62.5

从表4的结果可以发现,采用7个局域网,会节约2.8m线束,但增加一个网关控制器。考虑到整车电器系统的可配置性和扩展性(在高档配置中,可能会增加部分电器),最终采纳了7个局域网的优化结果。

G₅分布在电平舱内,其余的局域网分布在车顶、车前、车中前、车中中、车中后、车尾,根据骨干线束的空间位置,并结合组网结果进行布置,如图9a~f所示。

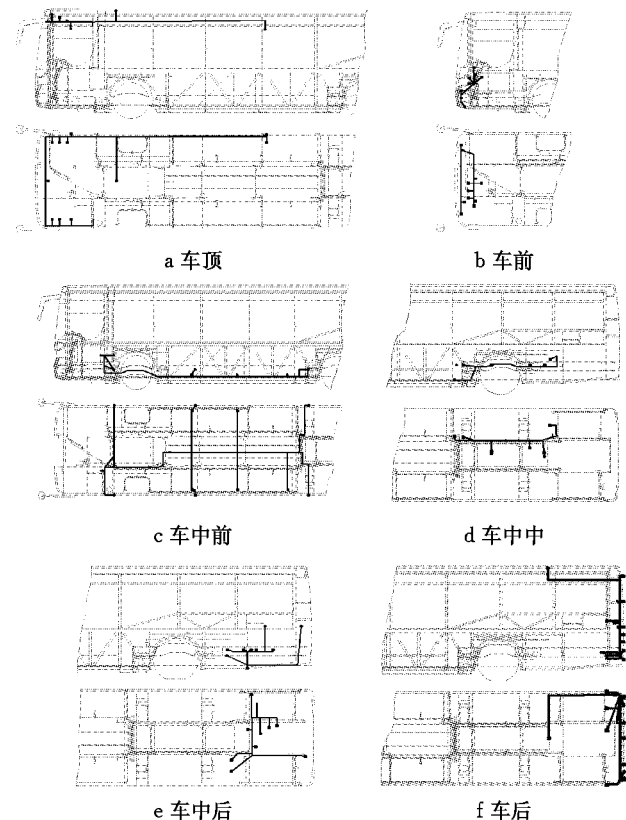


图9 车身体电器局域网组合与分布

Fig.9 Local network layout and distribution of body electrical system

根据表4与图9的局域网结构,最终设计了该车的全身分布系统,最后完成的原型样车工作可靠、证明这种局域网组网优化方法完全可行。

4 结论

通过电器位置降维排序、定义线束测度距离,并同时考虑网络的可调度性约束条件,将局域网组网优化问题化为有限容量的有序样品聚类最优分割问题。全局搜索算法在车载电器系统的组网优化应用情况下能有效求解最优组网的问题。最后通过实际应用证明,有限容量的有序样品聚类分析方法对于

局域网组网优化是有效可行的。

参考文献:

- [1] Leen G, Heffernan D, Dunne A. Digital networks in the automotive vehicle [J]. *Computing & Control Engineering Journal*, 1999, 10(6):257.
- [2] Kang X. Body electronics solutions[C]// China International Automotive Electronics and Technology Seminar (AES China). Shanghai:[s. n.],2005: 1-4.
- [3] Zhou L. CAN bus application solutions. *Automotive electronics* [EB/OL]. [2011-10-01]. <http://www.zlgmcu.com>, 2004.
- [4] Froeberg J, Sandstroem K, Norstroem C, et al. A comparative case study of distributed network architectures for different automotive applications [M]//*Handbook on Information Technology in Industrial Automation*. [S. l.]: CRC Press, 2004:1-15.
- [5] Johansson K H, Toerngren M, Nielsen L. Vehicle Applications of Controller Area Network[M]//*Handbook of Networked and Embedded Control Systems*. Boston: Birkhauser Boston, Inc, 2005: 741-765.
- [6] Volvo. Body building instructions[EB/OL]. [2009-02-01]. http://www.volvo.com/bus/global/en-gb/products/bodybuilding_instructions, 2009.
- [7] Timothy S N, Michael B, Andrew D. Smart camera system, USA, 0080618A1 [P]. 2003.
- [8] Berssenbrugge J, Bauch J, Gausemeier J. A night drive simulator for the evaluation of a predictive advanced front lighting system [C]// 4th International Conference on Information & Communications Technology, Morocco:[s. n.], 2006:1-2.
- [9] Joseph G C, Mohamed S M. Smart windshield wiper wash system; USA, 6236180 [P]. 2001-5-21.
- [10] Ochori M, Ishizuka T, Fujita T. Fundamental study of smart tire system [C]//*IEEE Proceedings of Intelligent Transportation Systems*. Toronto, IEEE, 2006:1519-1524.
- [11] 张新丰, 林凯, 刘旺, 等. 汽车语控智能电器系统[J]. *汽车工程*, 2007, 29(7):601.
Zhang X F, Lin K, Liu W, et al. The speech control of intelligent electrical/electronic system in vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2007, 29(7):601.
- [12] 张新丰. 汽车智能电器系统[D]. 北京: 清华大学, 2009.
Zhang X F. *Automotive intelligent electrical and electronic system*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [13] ZHANG X F, YANG D G, LIAN X M, et al. IEED system; a new kind of Automotive electrical system[C]// *Vehicle Power and Propulsion Conference*. Harbin: IEEE, 2008:1-5.
- [14] 张新丰, 杨殿阁, 连小珉. 汽车电器系统结构的全分布式设计[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2012, 40(7):118.
Zhang X F, Yang D G, Lian X M. Completely distributed automotive electrical system and its design [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(7):118.
- [15] Gu Z M, Yang D G, Zhang X F, et al. Distributed vehicle body electric/electronic system architecture with central coordination control[J]. *International Journal of Automotive Engineering*, 2010, 224(2): 189.
- [16] 张新丰, 薛雯, 陆良, 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.
Zhang X F, Xue W, Lu L, et al. Invariant wiring harness for vehicle electrical device connection [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2009, 49(2):281.
- [17] LIN Consortium. LIN Specification 2.0[EB/OL]. [2003-12-01]. <http://www.lin-subbus.org/>.
- [18] 张新丰, 杨殿阁, 陆良, 等. LIN总线的动态调度算法设计与应用[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(3):21.
Zhang X F, Yang D G, Lu L, et al. Dynamic scheduling algorithm for local interconnect network and its application [J]. *Transaction of Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2009, 40(3):21.