

文章编号: 1009-4687(2007)03-0032-05

混合动力特种车 APU 控制系统开发

陈锐¹, 罗禹贡¹, 马士奔²

(1. 清华大学, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘要: 本文设计的辅助动力单元(APU)控制系统采用恒压控制的结构. 首先优化了柴油发动机工作区域, 之后设计了发动机转速变增益 PI 控制器和发电机调压器. 最终在 APU 试验台架上的试验结果验证了发动机转速控制器的能够对发动机实际工作点有很好的控制效果, 并且 APU 的功率响应特性和输出电压的稳定性均能满足车载特种用电设备的要求.

关键词: 串联混合动力车; 特种车辆; 辅助动力单元; 变增益 PI 控制

中图分类号: U469.7 **文献标识码:** A

Development of Control System for the Auxiliary Power Unit in Hybrid Electric Special Vehicle

CHEN Rui¹, LUO Yu-gong¹, MA Shi-ben²

(1. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Beijing 100084, China; 2. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: The Auxiliary Power Unit (APU) control system adopted a constant voltage control configuration. The operating area of the diesel engine was optimized. An engine speed gain scheduling PI controller and a generator voltage regulator was designed. The bench test results showed the engine speed controller had good performance in controlling the actual engine operating points, while the power output response and the voltage stability could meet the requirements of the onboard special electric equipments.

Key words: series hybrid electric vehicle; special vehicle; auxiliary power unit; gain scheduling PI control

串联式混合动力车由于其发动机工作状态可与路面工况相对独立, 而且由于驱动电机大便于实现大功率的制动能量回收, 已经在城市工况中显示出较大的节油及排放优势^[1]. 与城市工况中使用的串联混合动力车相比, 串联式混合动力特种车辆不仅可以降低燃油消耗, 其搭载的辅助动力单元(Auxiliary Power Unit, 以下简称 APU)还可以作为野外电源使用, 并对于搭载的一些特殊的用电设备

供电. 这就需要 APU 能够提供瞬时大功率输出, 并且要保证输出电压相对稳定.

APU 作为串联混合动力车的主要能量源, 对车辆的燃油经济性、排放特性以及整车的动力性都有极大的影响. APU 是由内燃机和发电机组成的多输入多输出的复杂机电系统, 它的很多变量都相互耦合, 其控制问题一直是一个难点^[2]. 目前国内对 APU 的控制方法主要分两类, 一类是对发

修稿日期: 2007-07-09

作者简介: 陈锐(1981-), 男, 硕士研究生.

动机进行转速闭环控制同时对发电机进行功率^[2,3]或力矩^[4]闭环控制,另一类是对发动机进行功率^[5]或力矩^[6]控制同时对发电机进行转速闭环控制.它们的共同点都是选择一组能确定发动机工作点的参数作为被控量,使发动机的实际工作点跟踪上层控制策略中给定的工作点,这种APU的工作方式不能满足特种车辆对快速的功率响应和稳定的电压的需要.

为此本文面向某串联式混合动力越野特种车中特殊用电设备的需要,为它的柴油机APU开发了相应的控制系统.首先针对该串联混合动力特种车对高压供电系统的要求,设计了APU控制系统的结构.之后确定了柴油发动机的最优工作区间,在此基础上设计了发动机转速变增益PI控制器;同时还为发电机设计了调压器.最后在APU台架试验中对控制系统进行验证,控制效果比较满意.

1 串联式混合动力特种车及其APU系统

1.1 串联式混合动力特种车的高压电力系统

本串联式混合动力特种车为由前后两个电动机独立驱动的越野车辆,它的高压电力系统的结构如图1所示.除两台驱动电机外,该车同时还搭载了若干特种用电设备,它们对电源的要求包括:供电电压稳定,能提供瞬时的大功率输出.

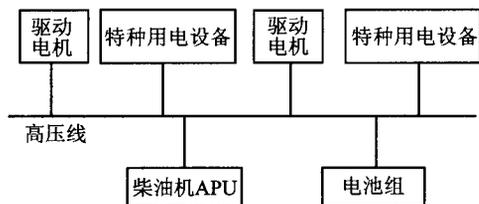


图1 串联式混合动力特种车高压电力系统结构

综合上述要求,本串联式混合动力特种车采用了一种特殊的整车控制策略.上层控制策略计算出功率需求发给驱动电机,而APU仅作为恒压电源,只在必要时调整输出端电压.当输出电压一定时,APU的输出电流(功率)完全跟随驱动电机及负载用电设备的需求.为此,为该车搭载的柴油机APU设计了一套恒压控制系统.

1.2 APU及其控制系统结构

柴油机APU及其控制系统框图如图2所示.其中,APU系统由柴油机、同步发电机和增速箱

组成.柴油机的油门开度可以通过一个步进电机来控制,发电机为交流同步无刷发电机,输出端装有旋转整流器,其输出电压可以通过调节励磁电流的大小来控制.APU控制器采用基于dSPACE的快速控制原型,便于控制算法逻辑的修改和在线整定控制器参数.

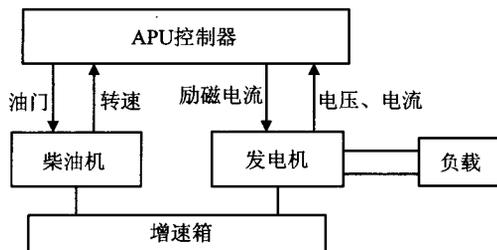


图2 柴油机APU及其控制系统

2 APU控制系统的开发

APU控制系统框图如图3所示.首先,APU控制策略根据当前APU实际的输出功率、SOC等信号计算出对发动机参考转速和对发电机的参考输出电压.之后,APU控制器对发动机和发电机分别采用转速闭环控制和输出电压闭环控制,由发电机调压器调节励磁电流使输出电压达到参考电压值;同时发动机根据当前实际输出的功率调整转速,以期使APU工作在最优的工作点上.

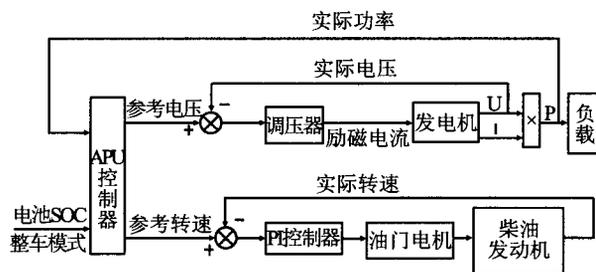


图3 APU控制系统框图

2.1 APU工作区域的确定

APU中的发动机工作区域的选取对整车的燃油经济性有很大影响,它的选取要考虑以下因素:

- ① 选取的发动机工作点的燃油经济性高;
- ② 发电机在对应的转速和功率下发电效率高;
- ③ 在发电机对应的转速范围中,保证其输出端电压可以达到用电要求.

柴油发动机万有特性图如图4所示.首先选择发动机工作点在燃油消耗为236 g/(kW·h)的区域

之内,并考虑到当发动机的转速在 1 600 r/min 以下时发电机不能发出额定电压,同时保证发电机有较高的效率.综上所述,选定发动机工作点在图示虚线区域内.其中左下和右上两条虚线为发动机 80 kW 和 160 kW 的等功率线,而发动机转速限定在 1 600 r/min 至 2 200 r/min 之内.

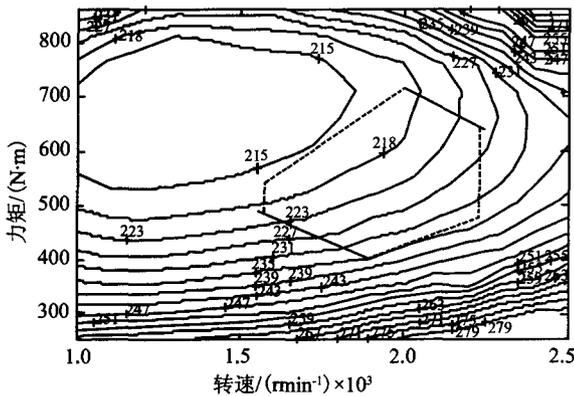


图4 柴油机万有特性图

进一步制定对应每一输出功率的发动机目标转速. 为了避免因转速和输出功率的耦合而引起的对发动机工作点控制不精确, 当需求功率在一定范围变化时保持参考转速不变, 即恒转速工作; 而当需求功率超出这一范围导致参考转速变化时, 则将发动机转速调整至新的目标转速上, 这时为调速阶段. 跟随需求功率过程中发动机转速调整的逻辑如图5所示, 为了避免在各个转速间的频繁切换, 保持发动机转速的相对稳定, 各目标转速所对应的功率范围有一定的重合.

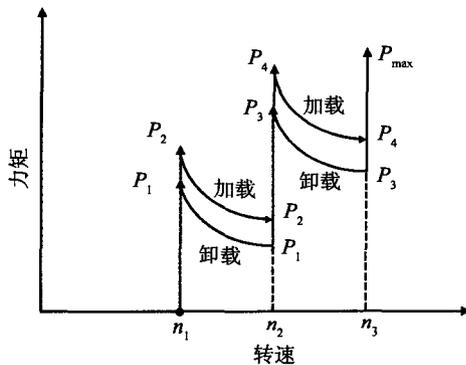


图5 发动机转速调整逻辑

2.2 发动机转速变增益 PI 控制器设计

考虑到发动机在恒转速模式中控制目标为超调量小, 而调速控制过程中的控制目标为稳定时间短, 所以在这两类控制过程中采用不同的控制器来实现多目标控制. 恒转速控制模式与调速控制模式

之间按照预先设定的逻辑进行切换.

在恒转速控制模式中采用鲁棒性较强的 PI 控制算法. 同时考虑到柴油发动机强非线性特性, 一套 PI 控制参数不可能在柴油机的整个工作区域中的不同状态都能有令人满意的控制效果, 有时甚至不能保证整个闭环系统的稳定性^[7], 为此在选定的不同的发动机参考转速附近采用不同的 PI 控制参数, 即采用变增益 PI 控制器.

为了避免增量式 PI 算法导致的静态误差, 转速 PI 控制器采用了简单的位置式 PI 算法. 这样 PI 控制器每次的输出量 $u(k)$ 也就是对油门电机的位置命令, 其控制规律如式(1)所示:

$$u(k) = K_{pm}e(k) + TK_{im} \sum_{j=0}^k e(j), m = 1, 2, 3. \quad (1)$$

其中 T 为计算步长.

可以看出, 控制器根据柴油机不同的目标转速选择不同的控制参数 ($m = 1, 2, 3$). PI 控制器对油门电机每次发出的控制命令 $u(k)$ 都与过去全部状态 $e(j)$ 有关. 若在调速控制模式中也采用同类型的 PI 控制器, 则切换不同 PI 控制器前后油门电机接到的控制命令的变化量为:

$$\Delta u = K_{pm}e(k+1) - K_{pn}e(k) + TK_{im}e(k+1) + T(K_{im} - K_{in}) \sum_{j=0}^k e(j). \quad (2)$$

其中 K_{pn} 和 K_{in} 为调速 PI 控制器的增益, K_{pm} 和 K_{im} 为恒转速 PI 控制器的增益.

当从调速 PI 控制器切换至恒转速 PI 控制器时, 由于实际转速已经很接近目标转速, 故油门命令应基本维持调速终了时的大小. 但式(2)的最后一项由于前后 K_{im} 与 K_{in} 的差别仍然会引起切换至恒转速 PI 控制一瞬间油门电机命令的突变. 为此, 将发动机转速控制器设计为统一的控制器的结构, 即一个变增益 PI 控制器. 它实现了对发动机的多目标和多状态控制, 如式(3)所示:

$$u(k) = K_{pq}e(k) + TK_{iq} \sum_{j=0}^k e(j), q = 1, \dots, 5. \quad (3)$$

这样 $\Delta u = K_{pm}e(k+1) - K_{pn}e(k) + TK_{im}e(k+1)$, 它在调速过程终了约等于 0, 避免了切换至恒转速控制模式时不合理的控制器输出的突变. 此外, 为避免由执行器(油门电机)范围限制而引起的转速超调, 还设计了防止因油门电机因位置限制而引起的积分饱和的逻辑, 修正后控制器输出为:

$$u(k) = \begin{cases} K_{pq}e(k) + TK_{Iq} \sum_{j=0}^k e(j), & 0 < u(k-1) < 100 \\ K_{pq}e(k) + TK_{Iq} \sum_{j=0}^{k-1} e(j), & u(k-1) \geq 100 \text{ 或 } u(k-1) \leq 0 \end{cases}$$

其中 $q=1,2\cdots5$. (4)

2.3 发电机调压器设计

图6为发电机调压器的工作原理图。调压器利用PID控制算法来调节输出端电压，由于调压器全部采用模拟电路，故调节励磁电流所用的时间非常短，从而保证了对输出电压的调节效果。同时，发电机调压器还监测其输出电流的大小，一旦输出电流超过500A时发电机控制器就会通过逐波限流的方式限制每个PWM波的占空比，以达到快速降低输出电压的目的，保证发电机及用电设备的安全。这也使得该发电机的外特性呈现近似的恒压-恒流的模式。

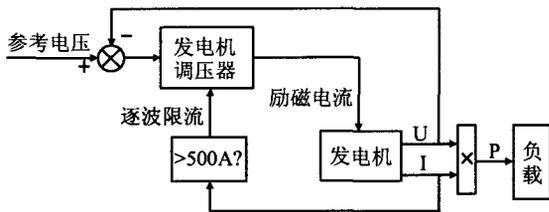


图6 发电机调压器工作原理图

3 APU 控制的台架试验验证

为验证 APU 控制器对发动机转速及输出电压的控制效果，搭建了 APU 试验台架。APU 试验系统的由 APU 部分和负载部分组成，如图7所示，其中粗实线表示机械连接。

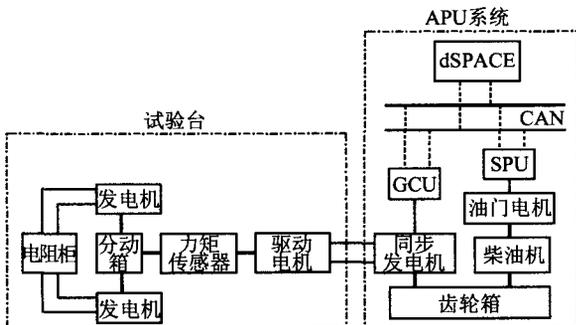


图7 APU 试验系统

APU 的控制部分由上位控制器 dSPACE、发电机控制器 GCU、信号采集单元 SPU 组成，它们之间基于 CAN 总线通讯。负载部分由直流电动机、力矩传感器、分动箱、两个发电机和电阻箱组成。为整定 APU 的各项控制参数以及模拟 APU 的各种工况对控制系统进行验证，设计了以下试验：APU 恒速变载试验、恒功率调速试验和实车工况试验。

3.1 恒速变载工况试验

图8为 APU 在 1 600 r/min 恒转速工作时，负载功率由 85 kW 迅速降至 10 kW，发动机转速及 APU 输出功率、端电压的变化曲线。在 APU 控制器的控制下，发动机转速的超调量不超过 50 r/min，满足恒转速工作模式中的控制目标；同时发电机端电压上升仅约 4 V，能够满足用电设备的要求。

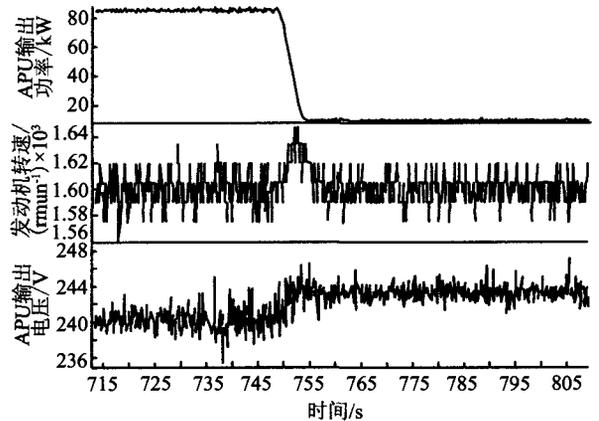


图8 1 600 r/min 恒转速卸载

图9为另一恒速变载试验。

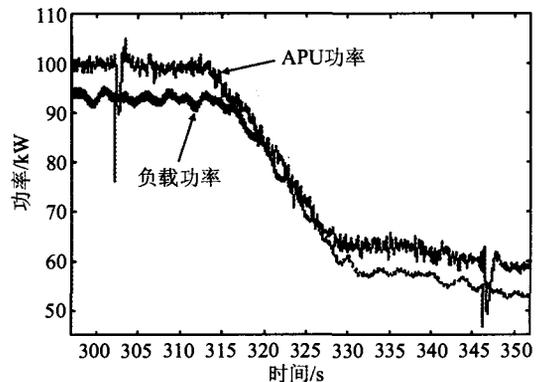


图9 APU 输出功率的响应

在 300 s 左右的负载功率突然下降了约 20 kW，而且只持续了 0.1 s，但在这之后约 0.6 s 时 APU 的输出功率马上跟随了这个脉冲，之后有一定的反

向超调. 这说明使用本控制方案的 APU 对负载变化的响应是比较快速、准确的, 完全能够满足特殊用电设备瞬时大功率输出的需求.

3.2 恒功率调速工况试验

图 10 为 APU 带载大约 90 kW 从 1 600 r/min 调速至 1 900 r/min 的工况, 稳定时间约 1.5 s. APU 控制器对发动机转速的控制相应迅速, 稳定时间短, 满足调速工作模式中的控制目标; 并且在整个过程中 APU 输出电压的波动小于 5 V, 能够满足用电设备的要求.

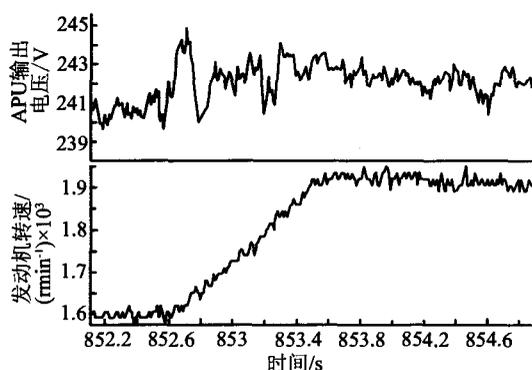


图 10 带载 1 600 ~ 1 900 r/min 的调速工况

3.3 APU 实车工况试验

最后, 在以上两个试验的基础上, 进行了 APU 实车工况的台架试验. 为模拟 APU 的实车工况, 试验台负载从 0 加载至发动机达到最大输出功率 150 kW, 之后再全部卸载. 在此过程中, APU 控制系统对发动机工作点的控制效果如图 11 所示.

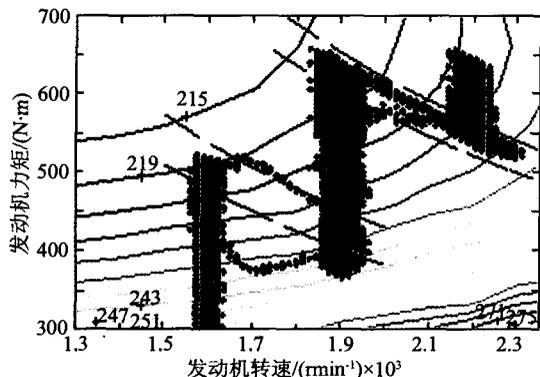


图 11 APU 实车工况中发动机工作点的分布

图 11 中点划线为等功率线, 可以看出在整个加、卸载过程中发动机实际工作点基本被控制在预先设定的区间附近, 控制效果比较理想. 在恒转速

稳态工作时, 随负载的变化发动机的转速波动均小于 40 r/min; 在 1 900 r/min 至 2 200 r/min 调速工况中发动机的转速有一定超调; 而在 1 900 r/min 至 1 600 r/min 调速工况中 APU 的输出功率向下波动较大, 在实车中这部分的输出功率就需要电池组来补偿了. 试验结果证明 APU 控制器在整个 APU 的优化工作区域内对发动机工作点的控制都是令人满意的, 为整车经济性的改进奠定了基础.

5 结 论

针对某特种混合动力车的高压用电系统为其搭载的柴油机 APU 设计了一套特殊的控制系统, 通过一系列台架试验证明该控制系统能保证 APU 具有良好的动态响应特性、功率跟踪特性和稳定的电压输出性能. 为 APU 中的柴油发动机设计了转速变增益 PI 控制器, 试验证明了该控制器不但在发动机不同工作区域内都有比较理想的控制效果, 同时它也实现了多目标控制.

参考文献:

- [1] Jan Andersson, Roger Axelsson and Bengt Jacobson. Route adaptation of control strategies for a hybrid city bus [J]. JSAE Review, 1999, (20): 531 - 536.
- [2] B. K. Powell, P. E. Bailey and S. R. Cikanek. Dynamic Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrain Systems [J]. IEEE control Systems, 1998, (1): 17 - 33.
- [3] B. K. Powell, P. E. Pilutti. A Range Extender Hybrid Electric Vehicle dynamic model [A]. Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control [C]. Lake Buena Vista, FL. 1994. 2736 - 2741.
- [4] 何 彬. 串联式混合动力辅助动力单元动态控制研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 12 - 16.
- [5] 成 森. 串联型混合动力电动汽车辅助动力系统[J]. 汽车工程, 2003, 25(3): 243 - 245.
- [6] Jae-wang lee, Hyeoun-dong Lee, et al. A Control Algorithm for Highly Efficient Operation of Auxiliary Power Unit in Series Hybrid Electric Bus [C]. EVS 19, Busan Korea, 2002.
- [7] J. Jiang. Optimal Gain Scheduling Controller for Diesel Engine [J]. IEEE control Systems. 1994, 14(4): 42 - 48.