

基于无级变速传动的并联式混合动力汽车 动力学仿真研究*

孙冬野 秦大同

(重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400044)

摘要: 采用金属带行星齿轮无限级变速传动系统的并联式混合动力汽车, 具有在相同动力性能下所需电动机功率小、燃油消耗少、废气排放低等特点。应用键合图理论, 分析了双模态型并联式混合动力汽车的发动机、电动机及离合器等部件的性能参数以及变速器速比在汽车加速行驶过程中的变化规律, 从而为进一步开发并联式混合动力汽车提供理论设计依据。

关键词: 混合动力汽车 无级变速传动 键合图 仿真

中图分类号: U463.2

0 前言

并联式混合动力汽车是一种 20 世纪 90 年代后期出现的、介于普通内燃机汽车和电动汽车之间的新型超低排放汽车, 根据电动机在整个汽车行驶过程中发挥的作用不同, 可划分为助动型、双模态型和里程延伸型混合动力汽车。其中, 双模态型混合动力汽车的发动机和电动机作为动力源均可单独驱动汽车运行。但发动机和电动机功率的选择与传动系统传动速比变化范围的大小密切相关, 随着速比变化范围的增加, 电动机选择的功率可大幅度降低^[1], 并显著地减小汽车对蓄电池数量的需求, 从而使整车重量大大降低。金属带行星齿轮无级变速传动系统作为一种理论上的无限级变速器, 将其应用于并联式混合动力汽车设计, 无疑会取得十分满意的效果。

在解决了金属带行星齿轮无级变速传动系统同步点处冲击振动的基础上^[2], 通过对 JL472Q1 发动机输出特性曲线和铅酸蓄电池性能参数的测试, 建立了并联式混合动力汽车的键合图仿真方程, 分析了整车加速行驶工况下电动机转速、发动机转速、无级变速传动速比、电动机电枢电流等参数在整个行驶过程中的变化规律, 从而为进一步开发并联式混合动力汽车提供理论设计依据。

1 动力参数的确定

JL472Q1 发动机稳态输出转矩、万有特性曲线

测试结果分别如图 1 和图 2 所示。其中, 如果将发动机供应特性场上每一个相应的功率都保持在最低油耗的转速下工作, 则发动机节气门开度与转速的关系即为最佳经济性转速调节特性。如果在每一个节气门开度下发动机均能在发出最大功率的转速下工作, 那么节气门开度与转速的关系则为最佳动力性转速调节特性。在本仿真研究中, 通过对传动系统速比的控制, 实现发动机稳定工作点位于最佳经济性曲线上。

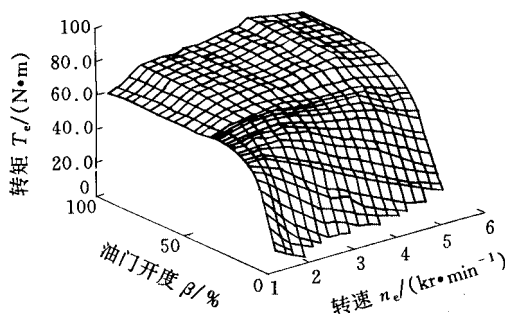


图 1 发动机稳态输出转矩图

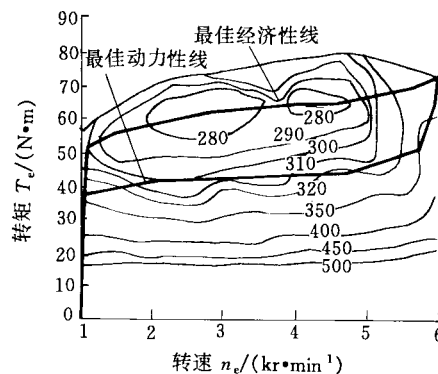


图 2 发动机万有特性曲线图

* 霍英东教育基金(81070)和国家自然科学基金(59835160)资助项目。
20010513 收到初稿, 20011129 收到修改稿

在并联式混合动力汽车设计过程中, 蓄电池能

量管理系统的开发设计至关重要，而蓄电池荷电状态的确定更是重中之重。在忽略电解水支路的条件下，其充放电模型可描述为(充电时 I_a 为负，放电时 I_a 为正)

$$E_c = k_a I_e n_m + I_a (R_c + R_a + R_p) + (L_a + L_e) \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

式中 R_a, R_c, R_p ——电动机电枢电阻、蓄电池内阻和极化电阻

I_a, I_e ——电动机电枢和励磁电流

L_e, L_a ——发电机电枢反馈电感和电动机电枢内部电感

E_c ——蓄电池电动势

n_m ——电动机输出转速

k_a ——电动机电枢感应电势常数

根据 Peukert 方程式

$$I^m \tau = \text{Const} \quad (2)$$

式中 m ——铅酸电池常数，约等于 1.35

I ——蓄电池恒流放电电流

τ ——蓄电池电动势降至终止电压 1.75 V 时，单体电池的放电时间

由 $I\tau = C$ 代入方程式(2)

$$CI^{m-1} = k_1 C_n I_n^{m-1} \quad (3)$$

式中 C ——蓄电池容量

k_1 ——修正系数，修正不同放电电流 I 下系数 m 的偏差，其值为电流 I 的函数

I_n ——额定电流

C_n ——电池额定容量

变流放电的荷电状态 S_c (State-of-charge)

$$S_c = 1 - \int_0^t \frac{Idt}{k_1 C_n} \left(\frac{I}{I_n} \right)^{m-1} \quad (4)$$

以铅酸蓄电池 DNG12/150 为例，借用试验数据得铅酸电池电动势与荷电状态的变化关系^[3,4]

$$E_c = 10.72 + 2.6S_c \quad 0.8 \leq S_c \leq 1$$

$$E_c = 12.0 + S_c \quad 0.4 \leq S_c < 0.8$$

$$E_c = 11.7 + 1.75S_c \quad S_c < 0.4 \quad (5)$$

蓄电池内阻 R_c 随荷电状态的变化关系

$$R_c = 0.0196 - 0.0248SOC + 0.0154SOC^2 \quad (6)$$

充电时，极化电阻 R_p 表示为 R_{pc} ，其与荷电状态的变化关系

$$R_{pc} = 0.0235 + 0.0046 \cdot \sin[1.25\pi(S_c - 0.4)] \quad (7)$$

放电时，极化电阻 R_p 表示为 R_{pd} ，其与荷电状态的变化关系

$$R_{pd} = 0.009S_c - 0.0042 \quad 0.8 \leq S_c \leq 1$$

$$R_{pd} = 0.0025S_c - 0.001 \quad 0.4 \leq S_c < 0.8$$

$$R_{pd} = -0.0045S_c + 0.0038 \quad S_c < 0.4 \quad (8)$$

根据国际电化学组织给出的铅酸蓄电池容量与温度的关系式，对铅酸蓄电池容量温度进行补偿

$$C_t = C_{30} \times [1 + K_t(T - 30)] \quad (9)$$

式中 C_t ——电解液温度为 T 时蓄电池的容量

C_{30} ——解液温度为 30 °C 时蓄电池的容量

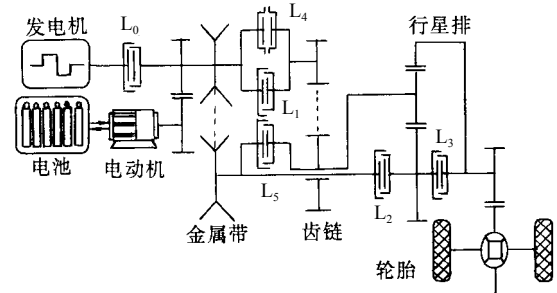
K_t ——蓄电池温度系数。国际电化学组织给出

$$K_t = 0.008$$

T ——电解液的温度

2 键合图仿真方程

并联式混合动力汽车传动系统结构如图 3 所示，其金属带行星齿轮无级变速传动系统是由 4 个关键部件构成：金属带无级变速装置、定速比齿链传动装置、行星齿轮传动装置和由 4 个湿式离合器 L_1, L_2, L_3 和 L_5 ，以及 1 个单向离合器 L_4 组成的离合器系统。通过调整离合器的不同组合，整个传动系统共分 5 个运行工况：倒挡、空挡、低速挡、过渡挡和高速挡。其具体工作过程及其同步点调控策略可参考文献[2,5]，在此不再作详细阐述。



(L_0, L_1, L_2, L_3, L_5 —离合器， L_4 —单向离合器)

图3 并联式混合动力汽车传动系统简图

当金属带行星齿轮无级变速传动系统处于低速挡（即混合无级调速工况）时，并联式混合动力汽车纯电动工况下的动力学键合图仿真模型如图 4 所示。

设整个汽车传动系统状态变量为 $X = \{p_2, p_7, p_{12}, p_{21}, p_{31}, p_{40}, p_{48}, p_{53}, p_{61}, q_5, q_{10}, q_{17}, q_{24}, q_{37}, q_{42}, q_{45}, q_{50}, q_{56}, q_{59}\}$ ，由系统的因果关系和功率流向得纯电动工况下混合动力汽车的键合图仿真方程

$$\begin{aligned} \dot{p}_2 &= M_m - \frac{R_0}{I_0 + I_1} p_2 - \frac{1}{C_{1,2}} q_5 \\ \dot{p}_7 &= \frac{1}{\beta_1} \left[-\frac{R_3 + i^2 R_{15} + i \cdot (I_{15} + I_{16} + I_{17}) \cdot i}{I_2 + I_3 + I_4 + I_5} p_7 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{C_{1,2}} q_5 - \frac{1}{C_{5,6}} q_{10} + \frac{i}{C_{13,15}} q_{24} \right] \end{aligned}$$

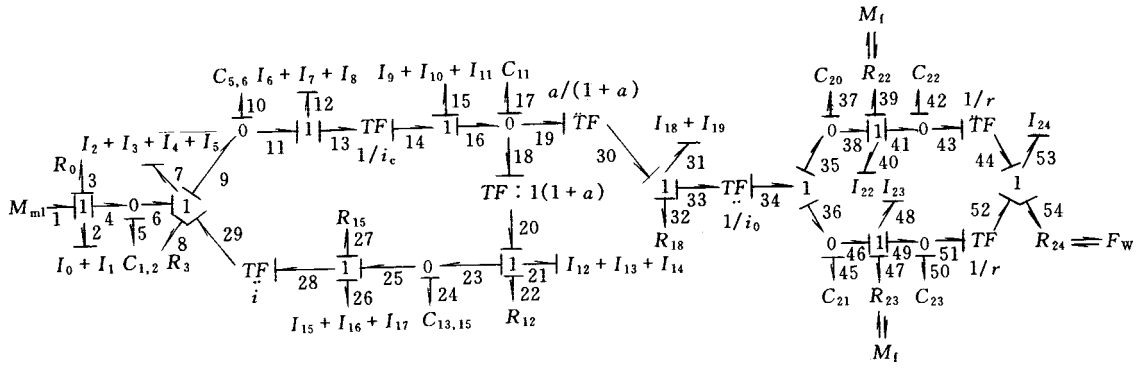


图 4 纯电动工况下传动系统的键合图模型

TF—变换器 I—惯性元 C—容性元 R—阻性元 1—共流结 0—共势结 M_m —电动机扭矩 M_f —滚动阻力矩 F_w —风阻 i —金属带速比 i_0 —主传动速比 i_c —齿链速比 a —行星排结构参数

模型中所应用的下标：

0. 电动机/发电机 1. 主动齿轮 2. 从动齿轮 3. 主动带轮 4. 离合器 L_4 主动盘 5. 离合器 L_1 主动盘 6. 离合器 L_1 从动盘 7. 离合器 L_4 从动盘 8. 主动链轮 9. 从动链轮 10. 离合器 L_2 从动盘 11. 行星轮与行星架 12. 太阳轮 13. 离合器 L_2 从动盘 14. 离合器 L_3 主动盘 15. 离合器 L_2 主动盘 16. 离合器 L_3 主动盘 17. 从动带轮 18. 齿圈 19. 离合器 L_3 从动盘 20. 21. 半轴 22. 23. 轮胎 24. 车体

$$\dot{p}_{12} = \frac{1}{\beta_2} \left[\frac{1}{C_{5,6}} q_{10} - \frac{i_c}{C_{11}} q_{17} \right] \quad \dot{q}_{50} = \frac{1}{I_{23}} p_{48} - \frac{1}{rI_{24}} p_{53} \quad (10)$$

$$\dot{p}_{21} = \frac{R_{12}}{I_{12} + I_{13} + I_{14}} p_{21} + \frac{1}{(1+a)C_{11}} q_{17} - \frac{1}{C_{13,15}} q_{24}$$

$$\dot{p}_{31} = \frac{a}{(1+a)C_{11}} q_{17} - \frac{R_{18}}{I_{18} + I_{19}} p_{31} - \frac{i_0}{C_{20}} q_{37} - \frac{i_0}{C_{21}} q_{45}$$

$$\dot{p}_{40} = \frac{1}{C_{20}} q_{37} - \frac{1}{C_{22}} q_{42} - M_f$$

$$\dot{p}_{48} = \frac{1}{C_{21}} q_{45} - \frac{1}{C_{23}} q_{50} - M_f$$

$$\dot{p}_{53} = \frac{1}{rC_{22}} q_{42} + \frac{1}{rC_{23}} q_{50} - F_w$$

$$\dot{q}_5 = \frac{1}{I_0 + I_1} p_2 - \frac{1}{I_2 + I_3 + I_4 + I_5} p_7$$

$$\dot{q}_{10} = \frac{1}{I_2 + I_3 + I_4 + I_5} p_7 - \frac{1}{I_6 + I_7 + I_8} p_{12}$$

$$\dot{q}_{17} = \frac{i_c}{I_6 + I_7 + I_8} p_{12} - \frac{1}{(1+a)(I_{12} + I_{13} + I_{14})} p_{21} - \frac{a}{(1+a)(I_{18} + I_{19})} p_{31}$$

$$\dot{q}_{24} = \frac{1}{I_{12} + I_{13} + I_{14}} p_{21} - \frac{i}{I_2 + I_3 + I_4 + I_5} p_7$$

$$\dot{q}_{37} = \frac{i_0}{I_{18} + I_{19}} p_{31} - \frac{1}{I_{22}} p_{40}$$

$$\dot{q}_{42} = \frac{1}{I_{22}} p_{40} - \frac{1}{rI_{24}} p_{53}$$

$$\dot{q}_{45} = \frac{i_0}{I_{18} + I_{19}} p_{31} - \frac{1}{I_{23}} p_{48}$$

式中 $\beta_1 = 1 + \frac{i^2(I_{15} + I_{16} + I_{17})}{I_2 + I_3 + I_4 + I_5}$
 $\beta_2 = 1 + \frac{i_c^2(I_9 + I_{10} + I_{11})}{I_6 + I_7 + I_8}$
 p —广义动量
 q —广义位移

金属带 行星齿轮无级变速传动系统在同步点处的控制问题已在文献[2]中解决，因此电动机驱动和发动机驱动下的过渡挡工况被忽略。传动系统处于高速挡（即纯无级调速工况）时的纯电动工况下的动力学键合图仿真方程，以及低速挡和高速挡时发动机工况下的键合图仿真方程可采用同样的方法来完成，在此不再重复。

3 仿真结果分析

由图1 JL472Q1 电喷发动机输出转矩图可以发现，当油门开度为 50%时，发动机输出转矩已基本达到最大限度，继续增大油门开度，发动机输出转矩变化很小。同时，考虑到低速行使时，汽车由电动机驱动，所以在本并联式混合动力汽车操纵踏板开度设计时，采用车速和操纵踏板开度双参数控制策略，即在汽车加速行驶过程中，当操纵踏板开度低于 50%时，汽车由电动机驱动；当车速高于某一设定值 v_1 且操纵踏板开度大于 50%时，汽车由发动机驱动；在汽车减速行驶过程中，操纵踏板开度控

制策略与加速行驶时的相同，但考虑到并联式混合动力汽车两动力源在由电动机驱动向发动机驱动过渡时主离合器接合的稳定性，加速过程车速控制设定值 v_1 与减速过程的设定值 v_2 是不相同的，其中 v_1 要高于 v_2 ^[6]。在本仿真计算过程中， v_1 设定为 55 km/h， v_2 设定为 50 km/h。

同时，考虑到发动机在低转速、小油门开度下，其比燃油消耗率偏高，而且在动力源由电动机驱动向发动机驱动过渡时，主离合器从动盘片已具有一个 1.5 kr/min 的初始转速，所以，并联式混合动力汽车与普通汽车发动机的最小油门开度并不相同，本车最小油门开度设定为 15%。

当混合动力汽车以一个较大的操纵踏板目标开度 ($\geq 50\%$) 由静止状态加速行驶时，为了尽快达到发动机最佳经济稳态工作点和减小汽车百公里加速时间，电动机将以满负荷状态进行工作。

本混合动力汽车电动机额定功率选为 8 kW，额定转速为 1.5 kr/min，当操纵踏板目标开度为 60% (目标发动机油门开度为 25%) 时，并联式混合动力汽车无级传动装置速比 i_t 、电动机/发动机输出转速 n_e 和车速 v 仿真结果分别如图 5 所示。

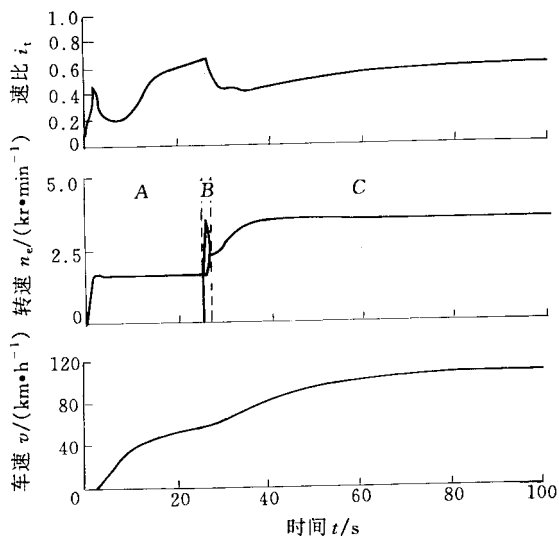


图 5 混合动力汽车仿真结果

其中，无级传动装置速比 i_t 与金属带速比 i 和齿链速比 i_c 的关系为

$$i_t = \frac{(1+a)i_c - i}{a} \quad (11)$$

由图 5 可以发现，混合动力汽车整个行驶过程可划分为三个阶段：在 A 区段，电动机将以满负荷状态进行运转。由于直流电动机起动时，其输出转速较低，电动机电枢感应电势 $k_a I_f n_m$ 较小，而电动机电枢的内阻又非常小，所以起车时电动机电流非常大，必须对电动机电流加以限制，其电流变化如

图 6 所示；B 区段是一个动力源转换的过程，首先，发动机开始起动，而此时汽车仍由电动机驱动。当发动机转速超过该油门开度下离合器接合的设定转速时，电动机关闭，离合器开始接合；C 区段则是从离合器接合完成后，发动机沿最佳经济曲线运行，直到达到稳定工作点。

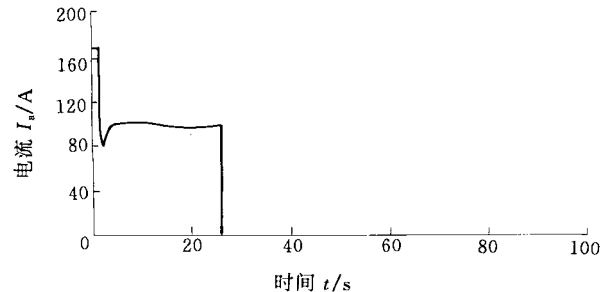


图 6 电动机电枢电流仿真结果

4 结论

采用大速比变化范围的金属带行星齿轮无级变速传动系统的并联式混合动力汽车，具有在相同动力性能下所需电动机功率小的特点，从而避免了小速比变化范围传动系统（如纯金属带无级变速传动、齿轮传动等）所要求的发动机、电动机联合驱动起车，或采用大功率电动机单独驱动起车的要求，消除了发动机低转速、高比油耗工况的出现，并有效地减轻蓄电池—电机系统的重量，使其在安装空间小、装车重量要求严格的轿车上应用更具有实际意义。

该仿真程序分析了双模态型并联式混合动力汽车的发动机、电动机及离合器等部件的性能参数以及变速器速比在加速行驶过程中的变化规律，从而为进一步开发并联式混合动力汽车提供理论设计依据。

参 考 文 献

- 1 Hohn B R, Pinnekamp B. The autark hybrid: a universal power train concept for passenger cars. International Gearing Conference, UK, London, 1994: 253~258
- 2 孙冬野, 秦大同, 胡建军, 等. 汽车金属带行星齿轮无级传动系统同步点振动控制研究. 机械工程学报, 2000, 36 (7): 43~47
- 3 陈全世, 林拥军, 张东民. 电动汽车铅酸电池放电特性的研究. 汽车技术, 1996(8): 7~11
- 4 李槟, 陈全世. 混合动力电动汽车中电池特性的研究. 汽车技术, 1999(10): 11~14
- 5 Vahabzadeh H, Linzell S M. Modeling, simulation, and control implementation for a split-torque, geared neutral, infinitely variable transmission. SAE. Paper 910409

- 6 葛安林. 车辆自动变速理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1993

SIMULATION ON DYNAMIC CHARACTERISTIC OF A PARALLEL HYBRID CAR WITH A METAL BELT-PLANETARY GEAR CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION

Sun Dongye Qin Datong
(Chongqing University)

Abstract: In order to reduce the pollution caused by a normal car at low speeds especially in the urban area, a parallel hybrid car with a metal belt-planetary gear continuously variable

transmission (CVT) is researched. Compared to a normal electric car with gear transmission system, it has many advantages such as a larger starting torque, a lower power, a lighter weight and so on. The simulation equations on the dynamic characteristic of electric car with a DC motor is established using bond graph theory. The control rules of the armature current of motor and ratio of continuously variable transmission are obtained. The design method of a parallel hybrid car is established.

Key words: Hybrid car Continuously variable transmission
Bond graph Simulation

作者简介: 孙冬野, 男, 1966 年出生, 工学博士, 副研究员。从事汽车系统动力学, 工程机械设计理论的研究工作。发表论文 40 篇, 参加国家自然科学基金和国家“八五”科技攻关等多项课题的研究, 获机械工业部科技进步二等奖 2 项。



(上接第 59 页)

- 2 Bullinger H J, Warschat J. Rapid product development—an overview. *Computers in Industry*, 2000, 42(2): 99~108
- 3 Chen Y H, Wang Y Z. Data reduction in integrated reverse engineering and rapid prototyping. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1999, 12(2): 97~103
- 4 Chen Y H. Integrated reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 1998, 34(1): 481~484
- 5 孙玉文, 王晓明, 刘健. 反求工程中复杂多面体模型的网格简化算法. *中国机械工程*, 2001, 12(8): 922~925
- 6 孙玉文, 王晓明, 刘健. 三维面形测量中的基于神经网络的数据修补技术. *计量学报*, 2001, 22(1): 7~11
- 7 Lee Kwan H, Woo H. Direct integration of reverse engineering and rapid prototyping. *Computers & Industrial Engineering*, 2000, 38(1): 21~38
- 8 Stroud, Xirouchakis P C. STL and extensions. *Advances in Engineering Software*, 2000, 31(1): 83~95

RAPID PROTOTYPING MANUFACTURING BASED ON CLOUD DATA FROM FREE-FORM SURFACE

Sun Yuwen Jia Zhenyuan
(Dalian University of Technology)
Wang Yuechao Liu Weijun

(Robotics Laboratory, Chinese Academy of Science)

Abstract: Physical model recovered from cloud data only with coordinate information is of great importance in the integration of reverse engineering and rapid prototyping technology. A new method, that rapidly generates prototype from sampled points, is proposed. Based on establishing the spatial partitioning representation of point cloud, the contour data in each layer is firstly calculated and sequenced, then amended to generate exact slice file. It overcomes lots of drawbacks in traditional integration such as consuming time and needing expert modeling skills. Moreover, without the intermediate transactions of STL file, the work of checking and repairing mistakes of facets is avoided. It is very suitable for laminated object manufacturing and greatly improves the pretreatment efficiency of RP technology.

Key words: Reverse engineering Data cloud
Direct slicing Rapid prototyping

作者简介: 孙玉文, 男, 1971 年生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进制造技术、反求工程、CAD/CAM 等。已发表论文 10 余篇