

文章编号:1000-582X(2005)06-0004-05

# 汽车发动机起动过程的动力学仿真\*

李红朋,秦大同,杨阳,徐佳曙  
(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

**摘要:**发动机怠速自动起停是混合动力汽车的重要工作模式,它能避免发动机在怠速下运行,有效减少燃油消耗、尾气排放和发动机磨损.对混合动力汽车起步时发动机起动力学进行了系统研究,基于发动机起动过程的阻力特性的建模与仿真,提出了ISG电机驱动控制策略,建立了ISG电机-发动机的综合控制模型,进行了发动机起动过程中的动力学仿真.仿真结果表明,所采用的ISG电机满足快速起动发动机的时间要求.

**关键词:**混合动力;发动机起动;ISG电机;动力性仿真

**中图分类号:**U461.1

**文献标识码:**A

ISG型混合动力汽车融合了传统燃油汽车和电动汽车的优点.通过发动机与ISG电机的最小程度耦合,能满足整车低排放、低油耗和低附加成本等综合要求,是一种最具开发应用潜力的清洁汽车.

发动机怠速自动起停是ISG型混合动力汽车的重要工作模式,车辆短暂停车时,能自动关闭发动机.车辆重新起步时,ISG电机快速起动发动机至设定转速,实现喷油点火.从而可避免发动机在怠速状态下运行,减少燃油消耗、尾气排放和发动机磨损.计算表明,在ECE-EUDC工况下,混合动力汽车采用发动机自动起停能提高整车燃油经济性10%以上.

混合动力汽车发动机的起动力学性能主要取决于发动机工作状态和电机控制方式.为了达到发动机起动时间的要求(不超过0.4s),对混合动力汽车起步时发动机阻力特性进行分析,并对ISG电机进行有效的驱动控制,显得十分重要.

## 1 发动机起动过程阻力模型

发动机起动过程中的阻力主要有:气缸压缩阻力、活塞环的摩擦阻力、活塞裙部的摩擦阻力、气门机构摩擦阻力、活塞组往复运动惯性力以及附属部件的运行阻力.这些阻力作用在曲轴上,产生相应的阻力矩 $T_g$ 、 $T_{F_1}$ 、 $T_{F_2}$ 、 $T_v$ 、 $T_m$ 、 $T_a$ (图1).

### 1.1 气缸内压缩空气的阻力矩 $T_g$

压缩空气直接作用在活塞顶部,推动活塞往复运

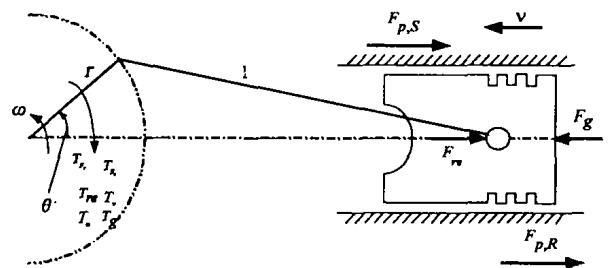


图1 曲柄连杆机构受力示意图

动,活塞处于压缩与排气行程时,压缩空气作负功,成为发动机的阻力矩;活塞处于吸气与作功行程时,压缩空气作正功,驱动活塞运动. $T_g$ 计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$T_g = (P_{gas} - P_0) S_p r K \quad (1)$$

式中: $p_{gas}$ ——气缸内的压力;

$P_0$ ——大气压力;

$S_p$ ——活塞顶部的有效面积;

$r$ ——曲柄半径;

$K$ ——转换系数,大小为

$$K = \sin\theta + \frac{r}{l} \sin\theta \cos\theta / \sqrt{1 - (\frac{r}{l} \sin\theta)^2};$$

$\theta$ ——曲柄的转角;

$l$ ——连杆的长度.

### 1.2 活塞摩擦阻力矩 $T_{F_1}$ 、 $T_{F_2}$

根据发动机起动时的机体温度和润滑油流动状态,发动机起动可分为冷起动与热起动.对应不同的起动过程,活塞摩擦阻力是不同的.

\* 收稿日期:2005-03-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475067);重庆市自然科学基金(8718);江苏省汽车工程重点实验室开放基金资助项目(QC200403)

作者简介:李红朋(1979-),男,湖南安仁人,重庆大学硕士研究生,主要从事混合动力汽车的研究.

活塞摩擦阻力矩由活塞环摩擦阻力矩  $T_{F_r}$  和活塞裙部摩擦阻力矩  $T_{F_s}$  构成。

### 1.2.1 冷起动时活塞摩擦阻力矩

在发动机冷起动的过程中, 润滑油粘度大、流动性差, 需要几分钟到十几分钟才能完全达到各摩擦部件<sup>[2]</sup>, 另外在低温情况下, 活塞环与气缸, 活塞与气缸之间间隙较大, 不可能形成润滑油膜。因此发动机冷起动时的润滑状态为边界润滑, 摩擦阻力系数可视为常数<sup>[3]</sup>。

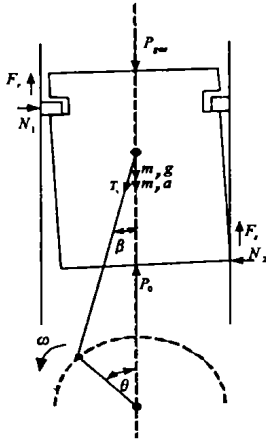


图2 活塞受力示意图

由活塞受力图(图2)可得以下方程:

$$N_1 = (P_{\text{gas}} + P_c)S_r, \quad (2)$$

$$T_1 \sin\beta + N_2 - N_1 = 0, \quad (3)$$

$$F_r = \mu N_1, \quad (4)$$

$$F_s = \mu N_2. \quad (5)$$

联立式(2) - (5)求解可得活塞环 - 缸套摩擦力对曲轴的阻力矩:

$$T_{F_r} = \mu(P_{\text{gas}} + P_c)S_r r |K|, \quad (6)$$

活塞裙部 - 缸套摩擦力对曲轴的阻力矩:

$$T_{F_s} = \frac{(P_c + P_0)S_r(1 - \mu \tan\beta) + ((P_{\text{gas}} - P_0)S_p + m_p(g + a))\tan\beta}{\tan\beta + \frac{1}{\mu}} r |K|, \quad (7)$$

式中:  $T_1$ ——连杆对活塞销的作用力;  
 $\mu$ ——活塞与气缸之间的摩擦系数;  
 $P_c$ ——活塞环对气缸的弹性压力;  
 $S_r$ ——活塞环与气缸的接触面积;  
 $\beta$ ——连杆与活塞中心线的夹角;  
 $P_0$ ——大气压力;  
 $m_p$ ——活塞组的质量;  
 $a$ ——活塞的往复加速度;  
 $g$ ——重力加速度。

### 1.2.2 热起动时活塞摩擦阻力矩

发动机热起动时, 机体温度高, 机油还未冷却下来, 各活塞环槽中的机油保有量多; 另外活塞环与缸套间的间隙较小, 润滑较好, 处于弹性润滑状态。

活塞环 - 缸套间摩擦力对曲轴的阻力矩<sup>[4]</sup>:

$$T_{F_r} = a_1[\eta\nu(P_2 + P_{\text{gas}})w]^{0.5}D(n_o + 0.4n_c) \quad (8)$$

式中:  $a_1$ ——活塞环形状系数;

$\eta$ ——润滑油的运动粘度;

$w$ ——活塞环厚度;

$D$ ——气缸直径;

$n_o$ ——油环个数;

$n_c$ ——气环个数。

活塞裙部 - 缸套摩擦力对曲轴的阻力矩:

$$T_{F_s} = a_2\left(\eta \frac{\nu}{h}\right)DMr |K| \quad (9)$$

式中:  $a_2$ ——油膜厚度的影响系数;

$h$ ——油膜厚度;

$M$ ——活塞裙部的长度。

### 1.3 气门机构的磨擦阻力矩

Staron 与 Willermet 对气门机构的磨擦阻力的研究表明, 气门机构的磨擦阻力发生在凸轮/挺杆、摇臂/气门支点之间<sup>[5]</sup>。

摩擦阻力矩计算公式为:

$$T_v = \frac{0.26GL_r |K|}{\sqrt{\omega}} \quad (10)$$

式中:  $G$ ——单个气缸内气门的数量;

$L_r$ ——气门弹簧的载荷;

$\omega$ ——曲轴角速度。

### 1.4 附属部件运行阻力矩 $T_a$

$T_a$  包括水泵、机油泵、燃油泵、发电机等附属部件的运行阻力矩及空载下曲轴和凸轮轴的磨擦阻力矩, 大小与曲轴转速成正比, 可以表示为:

$$T_a = a_3\eta\omega, \quad (11)$$

式中:  $a_3$ ——附属机构载荷系数。

### 1.5 活塞组往复运动惯性力矩 $T_{re}$

活塞组的往复运动惯性力矩很大, 其值与活塞组质量及活塞加速度成正比, 即:

$$T_{re} = m_p ark \quad (12)$$

### 1.6 发动机起动过程的总阻力矩的计算

ISG 型混合动力汽车采用 474Q2 型发动机, 其主要参数见表 1。发动机中 4 个缸之间的位置角相差 180°。

假定其中某一缸的阻力矩为  $T_{L1}$ :

$$T_{L1} = T_{F_r} + T_{F_s} + T_v + T_a + T_g + T_{re}, \quad (13)$$

可用一个函数表示:

$$T_{L1} = f(\theta, \omega), \quad (14)$$

则其它 3 缸的阻力矩可分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} T_{L2} &= f(\theta + 90, \omega) \\ T_{L3} &= f(\theta + 180, \omega) \\ T_{L4} &= f(\theta + 270, \omega) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

作用在曲轴上的总阻力矩为:

$$T_L = T_{L1} + T_{L2} + T_{L3} + T_{L4}. \quad (16)$$

表 1 474Q2 发动机的主要参数

气缸数	气缸直径/mm	长径比
4	74	0.31
活塞组质量/kg	活塞环径向宽度/mm	单缸气门数
0.212	1.2	4

根据发动机主要参数和所建立的阻力模型,可计算冷/热起动条件下曲轴的总阻力矩(图 3-4 和图 5-6)

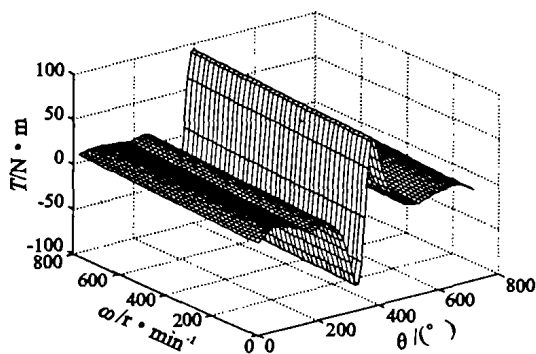


图 3 冷起下单缸阻力矩

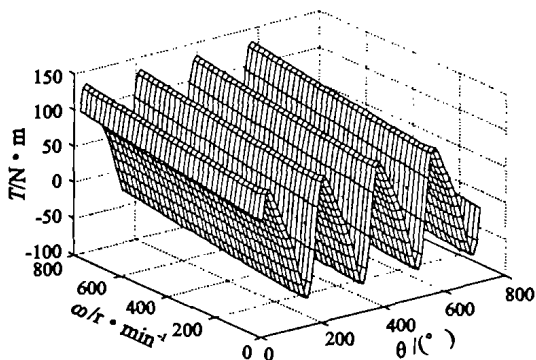


图 4 冷起下曲轴上的总阻力矩

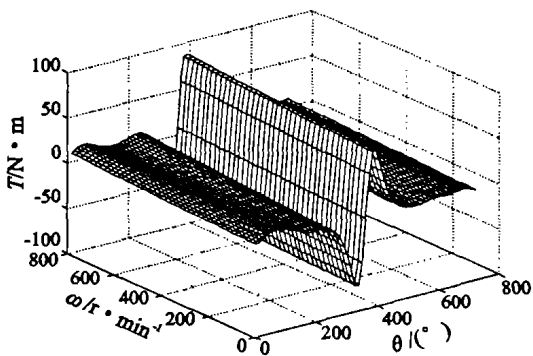


图 5 热起下单缸阻力矩

### 1.7 冷/热起动下的静摩擦阻力矩的计算

对于确定型号的汽油机,静摩擦力矩是可以测定的,其值随温度、润滑条件以及机组装配的情况变化很小。根据实测结果,静摩擦力矩可取  $29 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

## 2 发动机起动过程动力学分析

### 2.1 发动机起动性能要求

要保证发动机顺利的起动必须同时做到以下两个

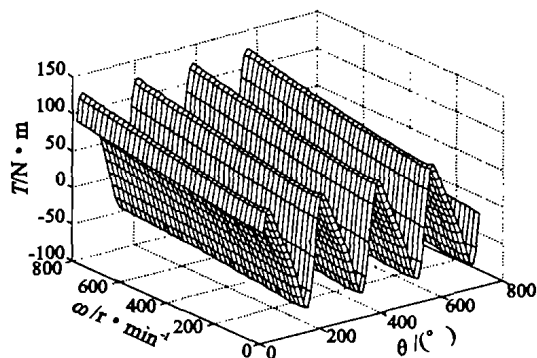


图 6 热起下曲轴上的总阻力矩

条件:1) ISG 电机必须提供足够大的转矩,驱动发动机在很短时间内达到设定转速;2) 发动机点火前的转速足够高,在压缩行程終了、点火之前,发动机气缸中形成能够着火的可燃混合气。

对于 ISG 型混合动力汽车,要求发动机起动到  $800 \text{ r/min}$  所需的时间不超过  $0.4 \text{ s}$ ,其起动过程的动力学模型和边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} T_e + T_g - T_F - T_L - T_r &= J\dot{\omega} \\ \frac{60}{2\pi} \int_0^t \dot{\omega} dt &\geq 800 \\ t &\leq 0.4 \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

式中:  $T_e$ ——电机的驱动力矩;

$J$ ——发动机机组与电机机组转换在曲轴上的转动惯量;

$\dot{\omega}$ ——曲轴的角加速度。

由此可见,根据不同的起动时间要求,求解以上方程,即可得到电机不同驱动力矩作用下,发动机起动过程中转速随时间的变化关系。

### 2.1 ISG 电机驱动控制策略

根据上面的分析可知,发动机曲轴上的阻力矩随转角位置和转速不断变化,ISG 电机需在  $0.4 \text{ s}$  内把发动机带到  $800 \text{ r/min}$ 。若对 ISG 电机进行实时控制,使其输出扭矩跟踪发动机曲轴阻力矩变化,将大大增加电机控制器件的开关频率,对元件寿命产生不利影响。本文根据电机低速下的恒扭矩特性,对电机采取最大扭矩/电流控制,保证 ISG 电机在低速下按最大扭矩运行,以满足发动机起动过程的动力性要求。

## 3 ISG 电机驱动控制与建模

### 3.1 ISG 电机的数学模型

ISG 电机为永磁同步电机,本文采用矢量控制对其进行动态分析,即利用 Clark 与 Park 分解,将三相电压、电流、磁链变换为与转子同步旋转的  $d-q$  坐标系中的两相矢量<sup>[6]</sup>。

经过 Clark 与 Park 变换后的 ISG 电机的动态方程为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

假设 ISG 电机是线性的,转子无阻尼绕组,忽略高次谐波、磁饱和、涡流、磁滞耗损以及温度对电机参数的影响,则

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \psi_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$T_e = p_n \{ \psi_f I_q + (L_q - L_d) I_d I_q \} \quad (20)$$

其中:  $i_a, i_b, i_c$ ——三相定子电流;

$\theta$ ——转子转角,电机与发动机刚性连接,电机的转子转角与发动机的曲轴转角一致;

$i_d, i_q$ —— $d, q$  轴电流;

$u_d, u_q$ —— $d, q$  轴电压;

$L_d, L_q$ —— $d, q$  轴等效电感;

$\omega$ ——定子电流电角速度;

$R$ ——定子相电阻;

$\psi_f$ ——转子永磁体在定子绕组上的耦合磁链;

$P$ ——微分算子;

$P_n$ ——电机极对数。

### 3.2 ISG 电机的驱动控制模型

根据发动机起动过程的时间要求,对 ISG 电机采用最大转矩/电流控制,采用转子磁链定向控制( $i_d = 0$ )时,式(17)可简化为<sup>[7]</sup>:

$$T_e = P_n \psi_f I_q \quad (21)$$

可见 ISG 输出转矩  $T_e$  与  $i_q$  成正比,通过对目标电流  $i_q$  进行控制,即可实现输出转矩  $T_e$  的控制。

ISG 电机控制器主要由 2/3 矢量变换器和电流滞环控制器组成,驱动控制模型如图 7 所示。

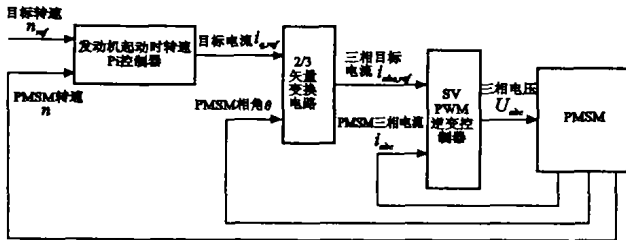


图 7 ISG 电机控制模型

## 4 ISG 电机 - 发动机综合建模与仿真

起动过程中 ISG 电机 - 发动机的综合模型如图 8 所示。当车辆接受到有效的起动信号,起动电机开始工作,电流急剧增大,当电机输出扭矩大于发动机的静阻力矩,发动机受动态阻力矩的作用。电机 - 发动机的目标转速设定为 800 r/min,当电机 - 发动机转速超过这

一转速时,发动机开始喷油点火,ISG 电机开始退出该工作模式。电机的仿真参数见表 2。

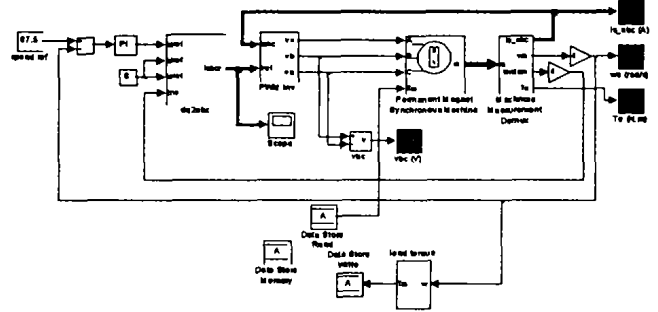


图 8 ISG 电机 - 发动机综合控制模型

表 2 ISG 电机的主要参数

功率/kW	额定电压/V	定子电阻/ $\Omega$
10	144	0.04
感应系数/H	磁通量/Wb	总转动惯量/kg·m <sup>2</sup>
0.01	0.11	0.31

根据所建立的起动过程中 ISG 电机 - 发动机的综合模型和电机的主要参数,在 Matlab/Simulink 平台上,进行发动机起动过程的动力学仿真,冷/热起动条件下的计算结果如图 9 - 11 和图 12 - 14 所示。

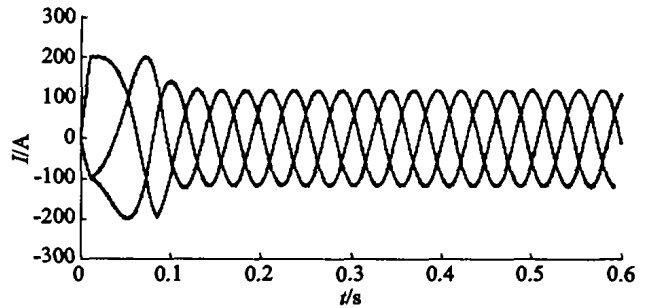


图 9 冷起动下电机定子三相电流随时间的关系

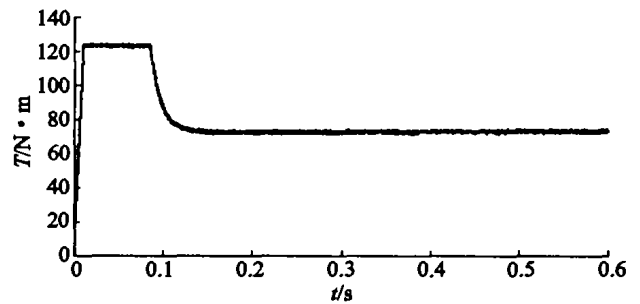


图 10 冷起动下电机输出扭矩随时间的关系

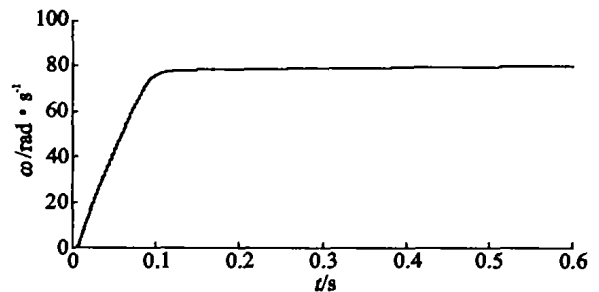


图 11 冷起动下电机机械角速度随时间的关系

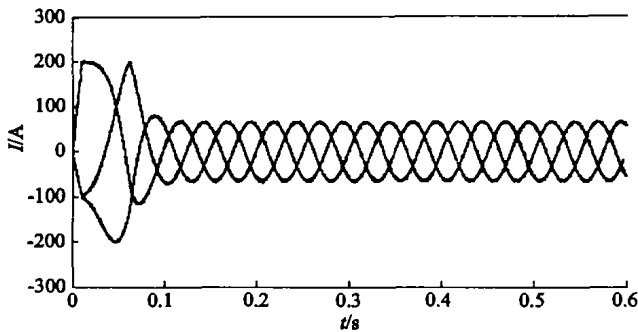


图 12 热起动下电机定子三相电流随时间关系

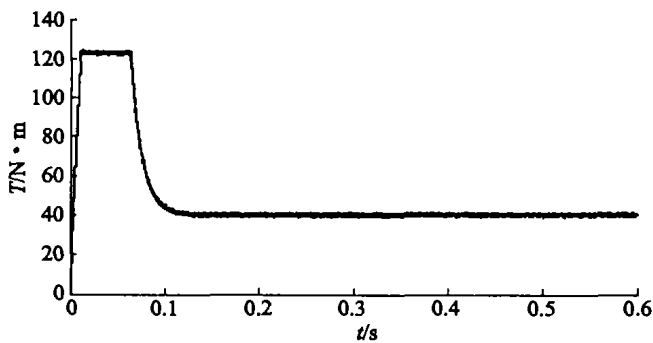


图 13 热起动下电机输出扭矩随时间的关系

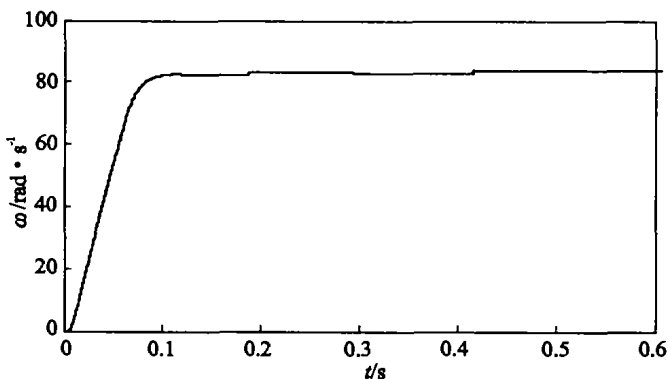


图 14 热起动下电机机械角速度随时间的关系

仿真结果表明,在 ISG 电机驱动下,冷起动时发动机加速到 800 r/min 所需时间为 0.16 s;热起动时发动机加速到 800 r/min 所需时间为 0.14 s. 表明所选用的 ISG 电机能够满足混合动力汽车起步时的时间要求.

## 5 结 论

1) 通过建立发动机动力学模型,推导出了发动机在起动情况下的各运行阻力矩的计算公式,并对其进行了仿真计算;

2) 基于混合动力汽车起动过程的动力性要求,建立了电机的数学模型,在 ISG 电机处于低速情况下,采用最大转矩/电流控制;

3) 以发动机起动时的运行阻力矩为输入负载,对电机的起动性能进行仿真,仿真结果满足混合动力汽车发动机冷热起动过程的动力性要求.

## 参考文献:

- [1] 郑启福. 内燃机动力学[M]. 北京:国防工业出版社,1991.
- [2] 姜水生. 内燃机冷起动性能测试与评价[J]. 内燃机, 2003,5(3):17-21.
- [3] 温诗铸,黄平. 摩擦学原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [4] 王成焘,姚振强,陈铭. 汽车摩擦学[M]. 上海:上海交通大学出版社,2002.
- [5] 唐少雄,马力,杨代华,等. 内燃机凸轮机构摩擦学仿真设计建模研究[J]. 内燃机工程,2002,6(23):59-61.
- [6] 李钟明,刘卫国. 稀土永磁电机[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [7] 苗晓燕,王小椿. 永磁同步电机高速转矩电流矢量控制方法和系统[J]. 电气传动,1999,3(1):7-10.

## Dynamics Simulation of ISG-HEV Engine During Starting

LI Hong-peng, QIN Da-tong, YANG Yang, XU Jia-shu

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The behavior of engine automatic starting and stop under idle speed is an important working model for HEV (hybrid electric vehicle), which can avoid engine running under idle speed. So it can reduce engine fuel consumption, exhaust gas emission and wear efficiently. The ISG (integral starter/generator) motor control strategy is given by dynamic research of the HEV engine starting, based on the model and simulation of resistant characters during engine starting, then an ISG motor-engine integral control model is built up and simulated. The result shows that the ISG motor can drive engine quickly and the simulation meets well with the need of starting time.

**Key words:** HEV; engine starting; ISG motor; dynamics simulation