

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.04.002

弱混合动力柴油机起工况仿真与试验*

魏长河¹ 王忠¹ 王宇成¹ 黄成海² 唐廷²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 一汽解放汽车有限公司无锡柴油机分公司, 无锡 214026)

【摘要】 针对采用 ISG 弱混合技术柴油机常温下的起工况, 通过分析控制策略, 建立了柴油机的动态管理仿真模型和 ISG 电机电磁模型, 对 ISG 电机拖动柴油机的起过程进行了仿真, 分析了起过程中电机功率、转矩随柴油机转速的变化关系, 并与柴油机起台架试验进行对比分析。研究表明, 采用 ISG 技术后, 当蓄电池的电压为 36~60 V 时, 均可将柴油机拖至目标转速, 满足起要求。起时, ISG 电机各绕组平均起转矩为 87.4 N·m, 线电流在 30~150 A, 输出功率呈先增后减的变化趋势, 功率峰值为 4.98 kW。从静止到着火转速的仿真起时间只需 0.4 s, 试验结果为 0.5 s; 从静止到怠速稳定的仿真时间仅为 2.8 s, 试验结果为 3.1 s, 试验与仿真结果吻合。

关键词: 弱混合动力 柴油机 起工况 仿真 试验

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0006-06

Simulation and Test on Starting Condition of Light-hybrid Diesel Engine

Wei Changhe¹ Wang Zhong¹ Wang Yucheng¹ Huang Chenghai² Tang Ting²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2. Wuxi Diesel Engine Works, FAW Jiefang Automotive Company, Ltd., Wuxi 214026, China)

Abstract

Aimed at the starting condition of light hybrid diesel engine with ISG technology in normal temperature, the working models of diesel engine and ISG electromotor were established. Then, the diesel engine moment of resistance on the starting condition was calculated to obtain the torque and the power from the ISG electrical machinery. And, the simulation to the starting process was carried out. Finally, the test of the ISG electromotor dragging diesel engine under the different voltage was performed to confirm the simulation result. The results showed that with the ISG technology, the diesel engine can be dragged to meet the requirement speed on the battery voltage of 36~60 V. The average starting torque of ISG motor is 87.4 N·m, the line current of each start winding is 30~150 A. and the output power of ISG fall after the first increase with the peak power of 4.98 kW. The simulated starting time from 0 to fire is 0.4 s, compared with the test result of 0.5 s; while time from 0 to stable idling in the simulation is only 2.8 s, the test result is 3.1 s. So, the test result is tallied with the simulation.

Key words Light hybrid, Diesel engine, Starting condition, Simulation, Test

引言

传统的柴油机起时, 由起电动机产生动力, 经起动齿轮组传递给飞轮齿圈, 带动飞轮、曲轴转动, 直到怠速或设定转速。由于着火转速较低, 起

时间较长, 混合气浓度较大, 因此排放性、动力性和燃油经济性都较差。

ISG(integrated starter generator)是一种弱混合动力技术, 也称作 ISA(integrated starter alternator)或 IMA(integrated motor assist)^[1]。不需对原有柴油机

收稿日期: 2009-06-22 修回日期: 2009-09-24

* 国家自然科学基金资助项目(50376021)和江苏省科技攻关资助项目(BG2004016)

作者简介: 魏长河, 博士生, 主要从事 ISAD 技术柴油机动力系统的匹配和控制分析研究, E-mail: weichanghe114@sina.com

通讯作者: 王忠, 教授, 博士生导师, 主要从事新能源开发以及低噪声、低排放柴油机工作过程研究, E-mail: wangzhong@ujs.edu.cn

作较大改动,仅在柴油机和变速器之间安装盘式 ISG 电机取代原有飞轮。

目前,国内外已开展了混合动力起动工况的研究工作^[2-5]。但关于混合动力柴油机,尤其是采用永磁同步直流无刷电机的混合动力柴油机起动工况的研究,国内文献介绍不多。

针对这些问题,本文拟采用集成一体化起动/发电机的 ISG 技术,结合控制策略,建立柴油机的动态转矩和 ISG 电机的电磁模型。对 ISG 电机拖动柴油机的起动过程进行仿真,分析柴油机首次着火转速到怠速过程中的电机功率和转速之间的关系,研究柴油机与 ISG 电机控制及特性匹配的关系,确定 ISG 电机的关键参数。通过 ISG 柴油机常温(20℃)起动台架试验,验证仿真结果。

1 起动工况的控制模式

ISG 柴油机起动可以分为从静止状态到着火转速以上以及首次着火到怠速两个阶段,当蓄电池荷电状态 SOC(state of charge)和柴油机冷却水温度满足条件时,采用稳态起动模式。ISG 集成控制器根据当前柴油机冷却水温度、蓄电池 SOC,确定柴油机着火转速。ISG 电机为转速控制模式,集成控制器通过 CAN 总线向 ISG 电机发送目标转速信号,如果电机转速没有达到着火转速,则 ISG 电机起动失败,发送故障代码至集成控制器,根据故障代码做出相应调整,重新起动柴油机;如果电机转速达到着火转速,柴油机着火起动。ISG 柴油机起动特点是:大幅度提高首次着火的转速,转速可由原来的 180 ~ 220 r/min 提高到 350 r/min。柴油机转速高,则压缩终了的温度较高,喷油压力高、燃油雾化好,柴油机更容易着火,起动过程的排放性能也大幅改善。

首次着火后,柴油机缸内温度不太高,混合气浓度大、混合不均匀,燃烧不充分,导致排放性较差;同时为防止柴油机首次着火后可能出现的“失火”现象,在柴油机首次着火后,ISG 电机继续提供相应的输出转矩,使柴油机快速到达怠速。柴油机首次着火后,ISG 电机改为转矩控制,柴油机和电机共同提供驱动转矩,利用电机的转矩补偿优化柴油机的动力性。当柴油机转速至怠速后,进入怠速暖机工况。

当柴油机冷却水温较低或者蓄电池 SOC 过少,不足以维持一次正常的起动过程,则采用非稳态起动模式。ISG 电机先起动到柴油机怠速转速,然后由转速控制模式转换为转矩控制模式,利用 ISG 电机的惯性带动曲轴机构,起动柴油机。

在非稳态起动过程中,集成控制器根据柴油机冷却水温和蓄电池的电压,确定 ISG 电机拖转的目

标转速;如果 ISG 电机经过设定时间后没有达到目标转速,则 ISG 电机起动失败,ISG 电机控制器向集成控制器发送电机起动失败的信息,集成控制器保存起动失败的故障信息;如果 ISG 电机转速达到了目标转速,ISG 电机转为转矩控制模式,控制器按照起动工况下各个 MAP 进行控制,同时检验柴油机转速是否达到了起动目标转速,如果达到了起动目标转速,向控制器发送起动成功信号,ISG 电机控制器接收到柴油机起动成功的信号后转为发电机工作模式,ISG 柴油机进入怠速暖机充电工况。

2 ISG 柴油机仿真模型及计算

2.1 柴油机动态仿真模型

柴油机采用基于动态管理的仿真模型,将整车的负载及各种损失以转矩的形式表示,便于 ISG 系统动力性的管理和协调。在 Matlab/Simulink 仿真系统中,柴油机的仿真模型如图 1 所示。

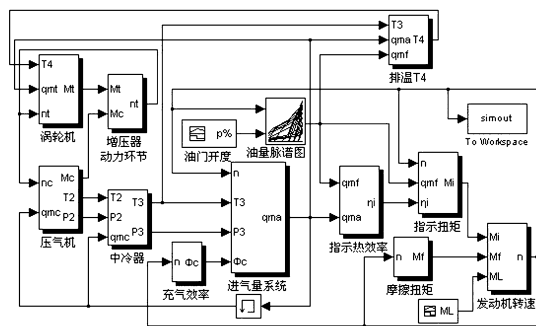


图 1 柴油机仿真模型

Fig. 1 Simulation model of engine

柴油机的动态转矩描述为

$$T_d = T_e \left(1 - \gamma \frac{d\omega_e}{dt} \right) \quad (1)$$

式中 T_d ——柴油机动态转矩

T_e ——柴油机稳态指示转矩

ω_e ——曲轴角速度

γ ——转矩下降系数,为 0.07 ~ 0.09

2.2 ISG 电机电磁模型

建模时,ISG 电机和电机控制器作为一个整体考虑,ISG 电机技术参数如表 1 所示。

ISG 永磁同步直流电机的定子为三相绕组星型连接,控制器由功率主电路和主控板构成,功率主控板由电机控制专用的 DSP 芯片及辅助和驱动电路等组成,如图 2 所示^[6]。

起动工况时,ISG 作为电动机工作,采用两相导通 6 状态的控制方式,任一时刻只有两只不处于同一桥臂的功率开关管导通,开关管为脉宽调制 PWM 状态。以 V1 和 V6 导通的磁状态为例,工作回路为蓄电池正极 → V1 → A 相绕组 → B 相绕组 → V6 → 电

池负运行,等效电路描述如图3所示。

表1 ISG电机主要技术参数

Tab.1 Main parameter of ISG motor

项目	参数
工作性质	永磁同步电机弱磁控制
工作效率/%	87
工作电压/V	36~72
额定功率(转速)/kW(r/min)	10(1600)
峰值功率/kW	15
最大承载电流/A	300
最高转速/r·min ⁻¹	2500
驱动电路保护方式	对欠压、过压、短路和过流等有保护功能

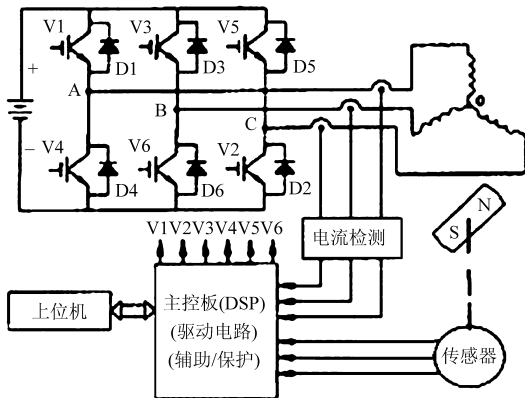


图2 ISG电机模型电路

Fig.2 Model circuit of ISG motor

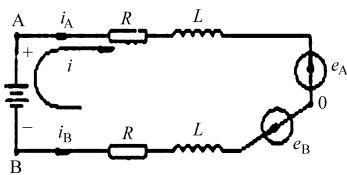


图3 V1、V6导通时的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit for V1, V6 connection

忽略导通管的压降,回路电压方程为

$$u_A - u_B = L \frac{d}{dt} (i_A - i_B) + R(i_A - i_B) + e_A - e_B$$

回路电流为

$$i = \frac{U_d - 2E}{2R} + \left(i_0 - \frac{U_d - 2E}{2R} \right) e^{-\frac{t}{T}} \quad (i_0 = i|_{t=0})$$

式中 R ——单相电阻

L ——相绕组等效电感

蓄电池电压 $U_d = u_A - u_B, e_A - e_B = 2E, E$ 为梯形波气隙磁场波形平顶宽度大于 120° 时的相电势。

电机的电磁转矩为

$$T_{M(AB)} = i \left(U_d - Ri - L \frac{di}{dt} \right) / \omega = 2\rho L [i_A - i_B] \cdot$$

$$\left[\begin{array}{cc} \sin(2\theta) & 0 \\ 0 & \sin\left(2\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} i_A \\ i_B \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} e_A \\ e_B \end{array} \right] / \omega = \frac{2Ei}{\omega}$$

(2)

式中 ρ ——极对数 ω ——角速度

对 V6 进行 PWM 控制,就可控制电流的平均值,从而控制 ISG 电磁转矩^[7],其他 5 个磁状态可同理分析。

2.3 起动总阻力矩

ISG 电机拖动柴油机由静止状态开始旋转,所提供的电磁转矩 T_M 必须克服起动总阻力矩 T_{st} 。忽略电磁影响,总阻力矩 T_{st} 主要包括摩擦阻力矩 T_f 、压缩阻力矩 T_c 和惯性阻力矩 T_j 。

(1) 摩擦阻力矩 T_f

摩擦阻力矩主要由润滑油在起动温度下的粘度决定,计算经验公式为

$$T_f = 5.35 \times 10^4 A_e (\nu \times 10^{-4})^{0.53} n_{st}^{0.34}$$

式中 A_e ——常数,取 0.1~0.3

ν ——润滑油的运动粘度

n_{st} ——柴油机起动转速

(2) 压缩阻力矩 T_c

每缸的压缩阻力矩可以通过曲柄所受的转矩来计算,即

$$T_c = F_a a$$

柴油机压缩为绝热压缩过程,不同活塞位置下的缸内压力为

$$p = \frac{p_0 V_0^k}{\left(\frac{\pi}{4} D^2 x_1 + V_k \right)^k}$$

式中 a ——曲柄长度

x_1 ——活塞顶到气缸顶的距离

V_k ——活塞顶凹坑的容积

由动力学可知

$$F_a = pA \frac{\sin\beta}{\cos\alpha}$$

式中 A ——活塞面积

α, β ——连杆与活塞、曲柄法线方向的夹角

(3) 惯性阻力矩 T_j

惯性阻力矩是柴油机在起动时间 t_{st} 内从静止状态加速到起动转速 n_{st} 所克服的惯性力矩,计算公式为

$$T_j = \frac{I_0 \pi n_{st}}{30 t_{st}}$$

式中 t_{st} ——柴油机从零加速到 n_{st} 所需的时间

I_0 ——柴油机所有运动件折算到曲轴上的转动惯量,取飞轮转动惯量的 1.2~1.4 倍

(4) 起动总阻力矩 T_{st}

对 6 缸的压缩阻力矩进行叠加,再加上摩擦和惯性阻力矩,得到起动总阻力矩。

对于 CA6DF 柴油机,压缩比 $\varepsilon = 17$,气缸直径

$D = 110 \text{ mm}$, 冲程 $s = 125 \text{ mm}$, 连杆长度 $l = 195 \text{ mm}$, 曲柄长度 $a = 62.5 \text{ mm}$ 。初压力 $p_0 = 0.12 \text{ MPa}$, 绝热指数 k 取 1.4。得

$$T_{st} = T_f + T_c + T_j = 96.88 + 5.94p \frac{\sin\beta}{\cos\alpha} \quad (3)$$

3 起工况控制仿真

3.1 起工况模块化控制

转速开始上升,当大于门限值时,ISG 系统进入起动模块,进行起动;如果转速有波动,偶尔出现低于门限值时,不应立即返回停止模块,而是在起动模块的策略中寻求实现起动成功。

在起动模块中,ISG 柴油机稳态模式起动,蓄电池向 ISG 电机供电,通过转换开关控制 ISG 电机作为电动机工作,带动柴油机转动,调节柴油机转速与目标转速同步。集成控制器根据柴油机转速,通过闭环控制调节电动机电流,改变电动机输出功率。柴油机着火后,ISG 电机继续工作,直至怠速。

设定判断逻辑:通过若干次对转速的检测来查看转速的变化情况^[8],如果转速一直呈下降趋势,则认为起动失败,由转出策略跳出起动模块,返回停止模块;当柴油机转速高于怠速,开始连续 N 次在起动模块中作检测,如果转速都高于怠速时,则认为起动成功,通过转出策略跳出起动模块,进入怠速模块。

3.2 常温起工况仿真与分析

针对常温起工况,根据 ISG 系统模型,结合控制策略,利用 Matlab/Simulink 软件平台^[9],进行起动仿真。

ISG 柴油机起动时,要求 ISG 电机将柴油机由静止状态拖至 350 r/min 的目标转速,柴油机在较高的转速下着火起动。ISG 电机可在不同的电流范围内工作,选用不同的起动电流,进行恒功率起动仿真,ISG 电机动力特性如表 2 所示。

在 ISG 电机的辅助起动作用下,柴油机 $0 \sim 350 \text{ r/min}$ 的起动时间减少。起动电流越大,起动时间越短,但波动性也越大。为了保证起动的平稳性,选用 $150 \sim 30 \text{ A}$ 递减的电机电流进行起动仿真模拟^[10],仿真结果如图 4 所示。

通过仿真可以看出,为了满足柴油机起动的基本要求,在刚起动时,即在柴油机转速小于 50 r/min 时,柴油机所需较大的起动转矩,此时选用较大的电流,ISG 电机各起动绕组转矩峰值达到 $104.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。随着柴油机转速的逐渐上升,所需转矩减小,因此可选用较小的电流驱动电机,在 300 r/min 时电机转矩已降至 $83.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

表 2 不同起动电流的动力特性

Tab.2 Dynamic features on different current

起动电流/ A	最大转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	最小转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	平均转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$
30	123	41.5	82.2
50	131	43.8	86.8
70	143	55.4	98.1
90	152	66.0	109.3
110	166	75.2	121.8
130	175	82.7	132.1
150	180	86.3	143.6

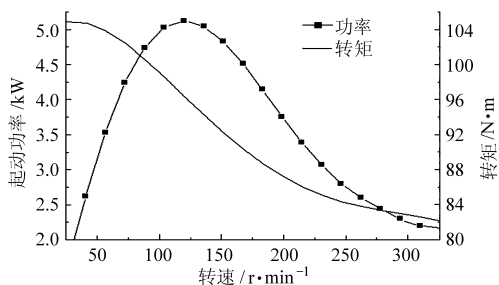


图 4 ISG 电机仿真特性

Fig.4 Simulation features of ISG motor

随着柴油机转速的提高,转矩逐渐降低,ISG 电机的功率从零开始,出现了先增后减的情况,通过仿真得出,最大功率出现在 145 r/min 时,达到 5.18 kW ;在 300 r/min 之后,ISG 柴油机着火起动,ISG 电机输出功率趋于平缓。

ISG 柴油机着火起动后,ISG 电机继续提供辅助转矩,将柴油机从首次着火转速拖至怠速。选用 350 r/min 的首次着火转速,怠速 700 r/min ,仿真结果如表 3 所示。

表 3 着火转速到怠速运转的仿真特性

Tab.3 Simulation features from fire to idling

转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	最大转矩/ $\text{N}\cdot\text{m}$	电流/A	辅助功率/kW
350	162.7	96.1	3.2
400	155.4	91.3	3.1
450	146.6	74.3	3.0
500	135.4	70.3	2.8
550	128.9	66.7	2.7
600	118.1	62.2	2.4
650	104.5	54.1	1.6
700	92.1	40.3	1.4

如表 3 所示,柴油机着火后,随着转速上升,柴油机输出转矩增加,需要的 ISG 助力转矩下降,ISG 系统通过控制电流逐渐降至稳定工作电流,实现电机转矩的卸载^[11]。

由于与柴油机同轴连接,安装在飞轮上的 ISG 电机的转速也随柴油机同步上升。电机驱动电流持续降低,故在柴油机着火到怠速的过程中,ISG 电机功率相应持续下降,通过仿真可以看出,在怠速 700 r/min 时,ISG 电机起动功率已衰减至 1.4 kW。

通过优化策略,合理分配柴油机和 ISG 电机的混合度,根据柴油机转速及系统需求,控制 ISG 电流,改变电机输出功率和转矩。在 ISG 电机辅助作用下,实现柴油机迅速起动。ISG 各绕组要提供的平均转矩为 85 N·m,起动过程仿真中,各绕组平均起动转矩为 86.7 N·m,符合技术要求。0~350 r/min 的起动时间为 0.4 s,0~700 r/min 的起动时间为 2.8 s。

4 常温起动台架试验

选用一汽解放汽车公司无锡柴油机分公司 CA6DF-19 型柴油机、兰州环电永磁同步直流无刷 ISG 电机、北京奥思源电机控制器、杭州中成 CWF180 型电涡流测功机、美国 SD 公司 DAQP-308 型发动机瞬态参数采集系统、德国 DATALOG 公司 DASylab5 型数据采集分析软件等进行常温(20℃)起动台架试验。

原柴油机中,驱动起动电机的蓄电池电压为 24 V。本试验中,根据 ISG 的技术参数,采用了 36、48、60 V 的起动电压,在柴油机不供油的情况下,ISG 电机拖动柴油机由静止运转至稳定转速,试验测量电压、峰值转速、起动稳定转速、输入最大电流/稳定电流、输入电压 DC、输出电压 AC 以及稳定后电压,试验结果如表 4 所示。

表 4 起动试验结果

Tab. 4 Experiment results of starting

测量参数	蓄电池组电压/V		
	36	48	60
峰值转速/r·min ⁻¹	350	463	560
稳定转速/r·min ⁻¹	334	446	535
峰值电流/A	144.7	148.9	139.0
稳定电流/A	43.2	43.8	50.5
输入电压 DC/V	32.0	41.4	49.2
输出电压 AC/V	23.2	31.7	35.1
稳定后电压/V	37.2	48.1	59.9

从表 4 可以看出,用 36、48、60 V 不同起动电压拖转柴油机时,均可将柴油机拖转至远高于着火转速的稳定转速。

采用 48 V 起动恒电压,柴油机供油着火,进行常温(20℃)起动试验,ISG 电机的电流、转矩及输出

功率在不同转速下的测量试验结果如图 5 所示。

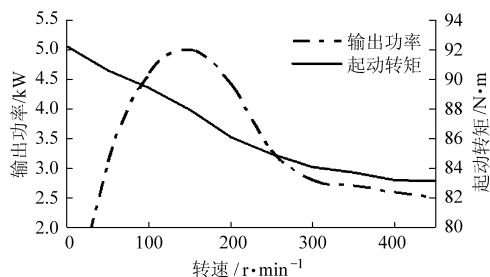


图 5 ISG 柴油机 48 V 起动试验结果

Fig. 5 Experiment results of ISG starting on 48 V

通过试验结果可以看出,在 0~450 r/min 的台架试验过程中,采用 48 V 恒定电压驱动 ISG 电机拖动柴油机,电机起动绕组的线电流在 30~150 A 范围内工作,稳定后电流为 43.8 A。ISG 电机各绕组提供 83~92 N·m 的起动转矩,并随着柴油机转速的上升而减小,平均值为 87.4 N·m;电机的输出功率呈先增后减的变化趋势,峰值功率为 4.98 kW,对应的柴油机转速为 152 r/min,试验与仿真结果吻合。

研究表明,原柴油机从静止到 200 r/min 着火转速需要 0.7 s,从静止到 700 r/min 怠速的起动时间为 5.3 s;采用 ISG 技术,着火转速可提高到 300 r/min 以上,0~300 r/min 的仿真起动时间只需 0.4 s,试验结果为 0.5 s;柴油机着火起动后,ISG 电机继续提供辅助转矩,将柴油机拖至怠速稳定,0~700 r/min 稳定的仿真时间仅为 2.8 s,试验结果为 3.1 s,且转速波动较小。

由图 6 可以看出,试验与仿真结果一致,与原有柴油机相比,ISG 柴油机着火转速高,转速响应快,起动时间短,且起动过程中转速过渡较为平滑。

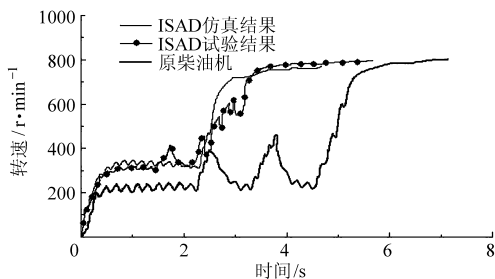


图 6 ISG 柴油机起动转速对比

Fig. 6 Starting speed of ISG engine

5 结论

(1) ISG 电机用 36、48、60 V 不同起动电压拖动柴油机时,均可将柴油机拖至稳定转速。柴油机着火时的转速大幅度提高,转速可达 350 r/min 以上。考虑到起动时的动力性和稳定性,兼顾本 ISG 电机性能,采用 48~60 V 的起动电压效果比较好。

(2) 48 V 恒电压起动时, ISG 电机输出转矩, 随着柴油机转速的上升而减小, 起动绕组的平均值为 $87.4 \text{ N}\cdot\text{m}$; 线电流在 $30 \sim 150 \text{ A}$ 范围内工作, 稳定电流 43.8 A ; 输出功率呈先增后减的变化趋势, 峰值功率为 4.98 kW 。

(3) 与原柴油机相比, 起动时间大大缩短, 且转速波动较小。从静止到着火转速的仿真起动时间只需 0.4 s , 试验结果为 0.5 s ; 从静止到怠速稳定的仿真时间仅为 2.8 s , 试验结果为 3.1 s , 试验与仿真结果吻合。

参 考 文 献

- 1 David Hermance, Sasaki S. Hybrid electric vehicles take to the street[J]. Spectrum IEEE, 1998, 35(11): 48 ~ 52.
- 2 Ming L K. An investigation of engine start-stop NVH in a power split powertrain hybrid hybrid electric vehicle[C]. SAE Paper 2006-01-1500, 2006.
- 3 Naeim A H, Taraza D. Exploration of the contribution of the start/stop transients in HEV operation and emissions[C]. SAE Paper 2000-01-3086, 2000.
- 4 姚国飞. 开关磁阻电动机起动性能的理论研究与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- 5 庄杰, 杜爱民, 许科. ISG 型混合动力汽车发动机启动过程分析[J]. 汽车工程, 2008, 30(4): 305 ~ 308.
Zhuang Jie, Du Aimin, Xu Ke. An analysis on quick start of engine in ISG HEV[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(4): 305 ~ 308. (in Chinese)
- 6 李红朋, 秦大同, 杨阳, 等. 汽车发动机起动过程的动力学仿真[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2005, 28(6): 4 ~ 8.
Li Hongpeng, Qin Datong, Yang Yang, et al. Dynamics simulation of ISG-HEV engine during starting[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(6): 4 ~ 8. (in Chinese)
- 7 季小尹, 符向荣, 王安丽. 混合动力电动汽车用永磁无刷直流电机的设计与实现[J]. 微特电机, 2004, 32(2): 5 ~ 7.
Ji Xiaoyin, Fu Xiangrong, Wang Anli. The design and realization of the permanent magnetic brushless DC motor for hybrid electric vehicle[J]. Small & Special Electrical Machines, 2004, 32(2): 5 ~ 7. (in Chinese)
- 8 秦国平, 姚维, 章玮. 基于 LIN 总线的车用无刷直流电机控制器设计[J]. 汽车工程, 2006, 28(6): 583 ~ 585.
Qin Guoping, Yao Wei, Zhang Wei. The design of the controller for vehicle brush-less DC motor based on LIN bus[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(6): 583 ~ 585. (in Chinese)
- 9 Karen L Butler, Mehrdad Ehsani, Preyas Kamath. A matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design[J]. IEEE Trans. on Vehi. Tech., 1999, 48(11): 1770 ~ 1778.
- 10 李华, 张健, 马晓军, 等. 神经网络在直流无刷电机控制系统中的应用[J]. 太原理工大学学报, 2002, 33(5): 475 ~ 477.
Li Hua, Zhang Jian, Ma Xiaojun, et al. Application of neuronetwork in the control system of DC motor[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2002, 33(5): 475 ~ 477. (in Chinese)
- 11 Kenneth J Kelly, Arun Rajagopalan. Bench marking of OEM hybrid electric vehicles at NREL, milestone report[J]. National Renewable Energy Laboratory, 2001, 17(8): 13 ~ 85.
- 12 刘庆华, 张为公, 李忠国, 等. 电动汽车直流电机调速的模糊控制仿真研究[J]. 成组技术与生产现代化, 2006, 23(3): 35 ~ 37.
Liu Qinhu, Zhang Weigong, Li Zhongguo, et al. Fuzzy-PID control simulation of DC motor drive of electric vehicle[J]. Group Technology & Production Modernization, 2006, 23(3): 35 ~ 37. (in Chinese)