

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.002

低温环境下 ISG 技术柴油机起动性能分析*

魏长河¹ 王忠¹ 叶飞飞¹ 唐廷² 黄成海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】 分析了低温环境下 ISG 技术柴油机起动性能的主要影响因素, 结合柴油机的起动阻力矩、最低起动转速和 ISG 电机工作特性等因素, 确定了 ISG 电机的最大输出功率; 考察了极板结构、电解液温度对蓄电池容量的影响, 研究了起动阻力矩与 ISG 电机功率、蓄电池容量之间的匹配关系, 得到了起动阻力矩随环境温度、起动转速的变化规律。试验表明: 减少极板厚度、增加极板高度, 适当提高电解液密度, 可以提高蓄电池容量; 在相同的环境下, 起动阻力矩随起动转速的提高而增大, 当转速高于 200 r/min 时, 转速每提高 50 r/min, 起动阻力矩增加 4 ~ 11 N·m; 当环境温度低于 0℃, 转速不变时, 环境温度每降低 5℃, 起动阻力矩增加约 3 ~ 5 N·m; -25℃ 下 ISG 技术柴油机的起动着火转速可达 350 r/min 以上, 起动时间缩短, 且起动过程中转速过渡较为平滑, 有利于提高起动工况下的动力性、改善排放性。

关键词: 柴油机 起动系统 ISG 低温 蓄电池

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0008-06

Analysis on Starting System of ISG Diesel Engine under Low-temperature

Wei Changhe¹ Wang Zhong¹ Ye Feifei¹ Tang Ting² Huang Chenghai²

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

2. Wuxi Diesel Works, Wuxi 214026, China)

Abstract

The main influencing factors of starting system under low temperature were analyzed, while maximum output power of the ISG motor was determined. According to starting resistance torque, minimum start-up speed, electrical operating characteristics, electric transmission coefficient and thermal effects, the influence of plate structure on battery capacity was also reviewed. The match relationship among starting resistance torque, ISG motor power and storage battery capacitance was summarized, and the changes of starting resistance torque along with ambient temperature and starting speed has been measured. The experiment result shows that as far as the environment temperature decreases by 5℃, starting resistance torque increases by 3 ~ 5 N·m at above 200 r/min; keeping speed constant, starting resistance torque increases by 4 ~ 11 N·m with every enhanced 50 r/min. The first fire speed of ISG diesel engine at -25℃ is increased, which is up to more than 350 r/min. The starting time is shorter than original diesel engine, and fluctuations in speed is smaller.

Key words Diesel engine, Starting system, ISG, Low-temperature condition, Storage battery

引言

ISG (integrated starter & generator) 是一种集成

一体化起动/发电机的轻度混合动力技术^[1], 采用 ISG 技术的柴油机, 取消了起动电机, 由 ISG 电机和蓄电池构成起动系统。起动时, 蓄电池供电, ISG 电

收稿日期: 2009-07-13 修回日期: 2009-10-11

* 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, 主要从事混合动力柴油机动力系统匹配和控制研究, 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和低噪声、低排放柴油机工作过程研究, E-mail: wangzhong@ujs.edu.cn

机带动曲轴转动,在很短时间内将柴油机拖转至远高于原着火转速的目标转速,然后柴油机着火。在柴油机首次着火后,ISG电机继续拖动曲轴旋转,迅速将柴油机拖转达到怠速。由于大幅度提高首次着火的转速,柴油机惯性力增大,燃烧室混合气温度较高,柴油机更容易着火,排放性能也将改善。

温度是影响ISG技术柴油机起动系统性能的重要因素,起动温度过低容易造成:润滑油的运动粘度增加,起动阻力矩增大;蓄电池的电压下降,ISG电机的输出功率降低,柴油机起动困难;柴油的不完全燃烧,造成排放污染物增加,严重污染环境。

针对低温环境下起动系统的性能问题,国内外学者已进行了大量的研究工作^[2-5]。然而,现有文献中关于低温环境下蓄电池容量与起动阻力矩变化规律,以及柴油机、ISG电机、蓄电池三者之间匹配关系的研究较少。本文以开发的ISG技术柴油机为研究对象,通过柴油机的低温起动试验,考察低温下蓄电池的结构参数对蓄电池容量的影响,分析低温工况下ISG电机的工作特性,以得到环境温度对ISG电机的输出转速、转矩、功率的影响规律。

1 低温环境下起动系统的匹配计算

ISG技术柴油机的结构是在原柴油机和离合器之间放置ISG盘式电机以取代传统飞轮,ISG电机将电动机和发电机合为一体,其转子直接安装在柴油机曲轴机构上,利用飞轮壳作为电机的定子,不需要胶带、滑轮和动力传动系统中的振荡阻尼器、胶带张力系统,因此不会增加柴油机的总重量和体积,如图1所示。

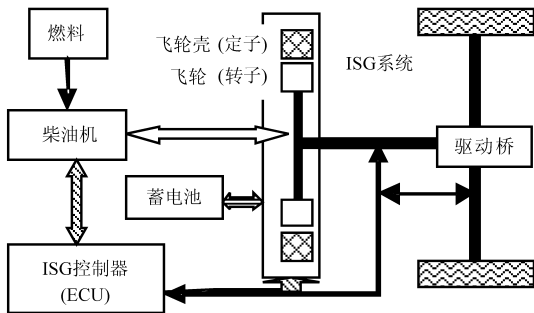


图1 ISG的结构示意图

Fig.1 Structure of ISG

1.1 ISG电机的匹配计算

ISG电机的功率匹配主要受柴油机的起动阻力矩的影响,而起动阻力矩与柴油机的最低起动转速密切相关,这两个因素均与环境温度有关:环境温度越低,燃油粘度增加,雾化困难,不利于混合气形成,使混合气压燃困难,最低起动转速将增大。

1.1.1 起动阻力矩

柴油机的起动阻力矩包括摩擦阻力矩、压缩阻

力矩及飞轮转动惯量矩,一般起动阻力矩 T_s 可由如下几种公式计算:

(1) 起动阻力矩 T_s 的传统公式

$$T_s = T_k + T_j + T_L$$

式中 T_k ——气体压缩负功产生力矩^[6]

T_j ——飞轮转动惯量矩

T_L ——起动摩擦阻力矩^[7]

其中 $T_j = \frac{\pi n_{Q_{\min}} J}{30 t}$ $T_k = 6.42 \frac{V_h}{i}$

$$T_L = \frac{3.18 F_f V_h i}{10^4 \tau}$$

式中 $n_{Q_{\min}}$ ——柴油机的最低起动转速, r/min

t ——柴油机从零加速到 $n_{Q_{\min}}$ 所需的时间, s

J ——柴油机所有运动件折算到曲轴上的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, 取为飞轮转动惯量的1.2~1.4倍

V_h ——发动机排量, L

i ——发动机气缸数 τ ——冲程数

F_f ——柴油机单位活塞面积的平均摩擦阻力, N

对于四冲程柴油机, F_f 由经验公式确定

$$F_f = 59 \times 10^5 \sqrt[4]{\nu}$$

式中 ν ——润滑油的运动粘度, m^2/s

(2) 赫沃谢夫 N C 和明金 M A 的计算公式

随着环境温度的降低,起动摩擦阻力矩在总的起动阻力矩中所占比例增大。不考虑气体压缩产生的负功,机械转动惯量矩等,建立摩擦阻力矩占主导因素的柴油机平均起动阻力矩^[8]

$$T_s = T_0 \left(\frac{\nu_s}{\nu_0} \right)^Y$$

式中 T_0 ——运动粘度为 ν_0 时的起动阻力矩

Y ——与转速有关的常量, $Y = 8.57 \times 10^{-4} n_{Q_{\min}}$

(3) S-G 经验公式^[9]

$$T_s = 0.39 V_h i \left[\varepsilon + 6 \sqrt{\delta_H} + 100 k_m \left(1 + \frac{\delta_H^2}{8} \right) \sqrt{\nu_s \frac{n_{Q_{\min}} \pi}{30}} \right]$$

其中 $k_m = 2.8$

式中 ε ——柴油机气缸压缩比

δ_H ——曲轴不均匀旋转系数

以CA6DF型柴油机为例, $i = 6$ 、 $\varepsilon = 17.5$ 、 $V_h = 2.83$ L、 $n_{Q_{\min}} = 200$ r/min、 $\delta_H = 0.8$ 。采用ISG电机倒拖柴油机,调节电机的拖动转速为200 r/min。

图2是在200 r/min时,利用不同公式计算的平均阻力矩与测量结果进行对比。如图所示:低温环境下,采用传统公式计算,考虑柴油机主要阻力矩的产生状况,计算结果和测量结果较吻合,最大的误差为4.15%;赫沃谢夫 N C 和明金 M A 的计算公式,

没有考虑压缩阻力矩和转动惯量矩,与测量结果最大误差为7.21%;而S-G经验公式误差较大。

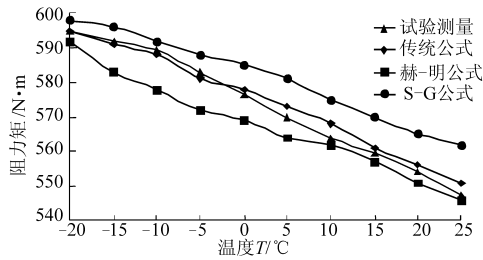


图2 不同公式计算的阻力矩对比

Fig. 2 Resistance torque result of different formulas

1.1.2 ISG电机功率的匹配计算

由柴油机的起动阻力矩与最低起动转速,可以匹配ISG电机的功率,为使柴油机顺利起动,ISG电机功率须适当大于柴油机所需功率。取匹配的ISG电机功率为柴油机起动所需功率的1.25倍,即匹配工作点位于ISG电机功率特性曲线左侧附近,留有一定裕量确保起动时大于柴油机的阻力矩,如图3所示。

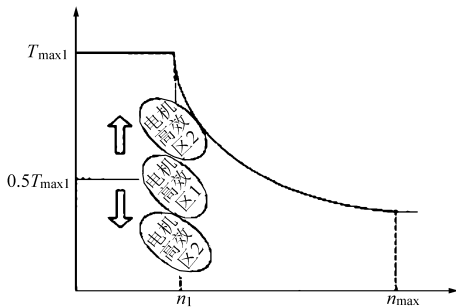


图3 ISG电机匹配的高效工作区

Fig. 3 Efficient workspace of ISG motor

ISG电机在高效区工作时,电机磁路接近饱和,转矩与电流的平方成正比,转矩特性曲线为直线,ISG电机工作较平稳,转速上升快,起动迅速。但随着ISG电机功率增大,电机体积、重量加大;若ISG电机功率匹配过大,匹配工作点远离最大功率点,ISG电机工作效率低,电机性能得不到充分发挥,当电机磁路饱和后,转矩特性曲线变化为抛物线,工作时转矩变化幅度大,转速不平稳,不能迅速上升,造成起动困难。

因此,ISG电机的匹配功率为

$$P_Q = 1.25 \frac{P_S}{\eta'}$$

式中 η' ——传动效率

ISG电机在起动点的转速 n_Q 、电磁功率 P_{Qem} 、转矩 T_Q 和最大输出功率 P_{Qmax} 为

$$n_Q = i' n_{Qmin} / \eta' \quad P_{Qem} = \frac{P_Q}{\eta_Q}$$

$$T_Q \geq \frac{T_S}{i' \eta'} \quad P_{Qmax} = \frac{T_Q n_Q}{9550}$$

式中 i' ——起动系统的传动比

η_Q ——ISG电机的电磁效率

1.2 蓄电池的匹配计算

蓄电池容量会随环境温度的降低而下降,内阻增加,起动电压与起动电流会下降,提供给ISG电机的电压不足,影响起动系统的性能。

1.2.1 蓄电池容量与ISG电机的匹配

在ISG柴油机起动系统当中,蓄电池的容量 Q 取决于ISG电机的最大输出功率,即

$$Q = (610 \sim 810) \frac{P_{Qmax}}{U_{XN}}$$

式中 U_{XN} ——蓄电池额定电压, V

1.2.2 蓄电池的输出容量与环境温度的关系

根据经验公式的得到蓄电池的容量与环境温度的变化关系为^[10]

$$Q_T = [1 + 0.01(T - T_1)] Q_{T_0}$$

蓄电池内阻与容量的关系为

$$R_T = \frac{KU_{XN}}{Q_T} = \frac{\eta(U_{XN} - U_{QZ}) - 4P_{Qmax}R_L}{4P_{Qmax}}$$

式中 T ——环境温度

Q_T ——温度 T 时蓄电池的容量

Q_{T_1} ——标定温度 T_1 时蓄电池的容量

K ——板极系数

则柴油机匹配的蓄电池标定容量为

$$Q_{T_1} = \frac{4KP_{Qmax}U_{XN}}{[1 + 0.01(T - T_1)][\eta(U_{XN} - U_{QZ}) - 4P_{Qmax}R_L]}$$

2 ISG柴油机低温起动试验与分析

对柴油机进行低温起动试验,考察蓄电池的性能参数随环境温度的变化关系,以及起动系统对柴油机起动性能的影响。

2.1 试验系统

选用无锡柴油机分公司CA型废气涡轮增压柴油机、兰州环电永磁同步直流无刷ISG电机及Bosch设计的ISG电机、北京奥思源电机控制器、杭州中成CWF180电涡流测功机、美国SD公司DAQP-308发动机瞬态参数采集系统、德国DATALOG公司DASYlab5数据采集分析软件及相关传感器进行台架试验,如图4所示。

系统中的电压、电流、环境温度、转速等信号,经滤波器放大滤波,由总线采集卡采集,进行A/D转换、存储,柴油机的起动阻力矩由转速转矩测量仪测量。起动电压和起动电流数据的采集电路是应用霍尔电流开、闭环传感器工作原理设计而成,用于采集电机起动电压和起动电流数据,并经过A/D转换为标准电压、电流信号,滤波后输送到计算机。

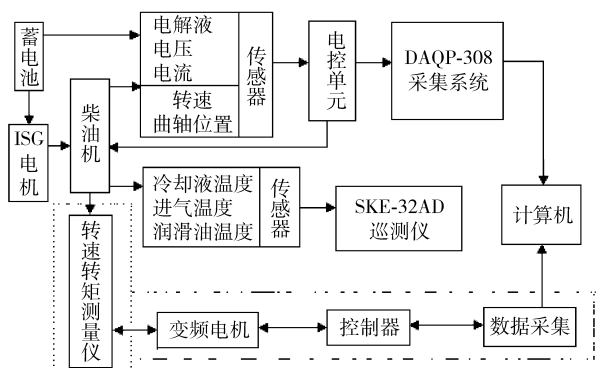


图4 柴油机低温起动试验系统

Fig. 4 Test system of diesel engine under low temperature

2.2 蓄电池性能试验与分析

2.2.1 蓄电池极板结构

低温下,对改进的6QW110D型蓄电池组与原6QW110型进行不同极板厚度和极板高度的蓄电池容量试验: -25℃、300 A持续放电60 s。试验结果如表1所示。

表1 蓄电池极板不同性能对比

Tab. 1 Performance contrast of different polar board

参数	蓄电池型号			
	6QW110		6QW110D	
极板极性	正	负	正	负
高度/mm	100	100	127	127
厚度/mm	1.8	1.4	1.4	1.1
活性物质质量/kg	2.7	2.67	2.84	2.80
起动容量/%	92	94	96	98
起动电压/V	8.71	8.81	9.54	9.56

通过试验结果可以看出:当极板厚度减小约20%时,起动容量增加约4%,起动电压增加约1%,活性物质质量增加约5%;当渗入电解液的极板高度增加约21.3%时,活性物质质量增加约25.6%;起动电压增加约3.7%。

由此可知:随着渗入电解液极板厚度减小,蓄电池的容量相应增加;随着极板高度增加,蓄电池的容量也相应增加。

2.2.2 蓄电池电解液温度

低温时,硫酸电解液的粘度和电阻增大,电解离子扩散困难,浓差极化明显,致使极板活性物质内部的化学反应难于顺利进行,特别是大电流放电时,蓄电池容量输出会急剧减少。通过试验得到电解液温度和蓄电池输出容量的性能曲线如图5所示。

电解液的温度为-25~0℃时,蓄电池容量变化不大,起动电压在8.7~12.3 V之间变化,最大起动电流678 A,满足低温起动要求;电解液温度在0~

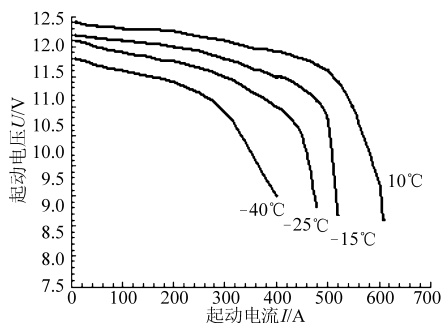


图5 电解液温度与蓄电池容量的关系

Fig. 5 Relation between electrolyte temperature and storage battery capacitance

10℃之间变化时,容量变化较明显;-40℃时,起动电流低于400 A,不能满足低温起动的要求。因此,低温起动时,电解液工作的温度范围为-25~10℃。

2.2.3 电解液密度

适当增加电解液的相对密度,可提高电解液渗透速度和蓄电池电动势,减小内阻,使蓄电池容量增大。但相对密度超过某一数值时,由于电解液粘度增大反而使渗透速度降低,内阻增加,极板硫化程度也增加,从而使蓄电池的容量减小^[11]。如图6所示:曲线和纵横坐标所围成的面积表示蓄电池的容量,相对密度过低或过高,均会导致低温时蓄电池容量下降。经测量,-25℃时,当电解液的相对密度为1.26 g/cm³时,蓄电池的容量为最大。

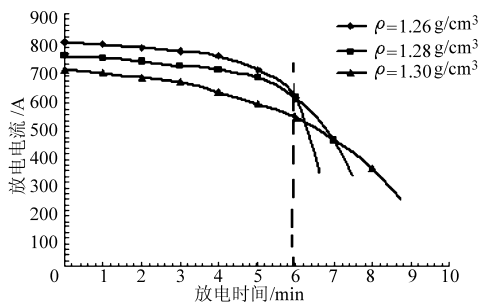


图6 电解液密度对起动性能的影响

Fig. 6 Dependence of discharge current and storage battery capacitance by on electrolyte density

2.2.4 蓄电池的起动电流

随着起动电流加大,电压下降加快,极板的活性物质转变为硫酸铅,电解液相对密度迅速下降,极板内部大量的活性物质不能参加化学反应,蓄电池实际输出的容量减小。对6QW110D型与6QW110型进行起动电流性能试验,如图7所示:起动电流在0~800 A范围内变化时,6QW110D型的低温起动容量高于6QW110型。起动电流在800~1000 A范围内变化时,6QW110D型和6QW110型的低温起动容量基本上维持不变。

2.2.5 低温起动性能

用改进前、后的蓄电池分别进行柴油机低温起

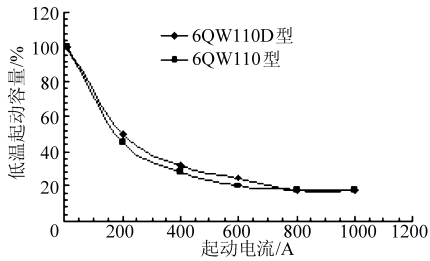


图7 改进前后低温蓄电池容量性能对比

Fig. 7 Performance contrast of storage battery capacitance

动性能试验,柴油机起动性能随时间的变化曲线如图8所示。

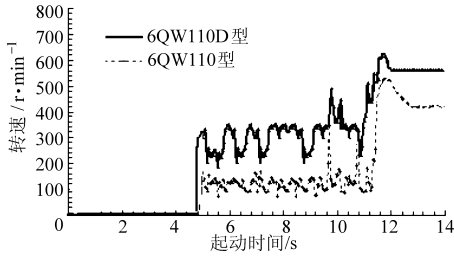


图8 改进前后低温起动对比试验

Fig. 8 Contrast of performance under low temperature

起动前,对柴油机进气进行4.8 s的预热。起动过程中,ISG电机输出转矩先增加后减小;输出的最大转矩,改进后较改进前提高了23.5%。起动着火后,ISG电机转矩降至柴油机怠速时的阻力矩;改进前的平均转速为145 r/min,改进后的平均转速为195 r/min,提高了25.6%;改进后的起动时的峰值转速为678 r/min,改进前起动峰值转速576 r/min,提高了17.7%;整个过程的起动时间缩短了13%。在起动过程中,柴油机的着火、转速波动性等方面,6QW110D型的蓄电池比较好。

2.3 起动阻力矩的分析

当环境温度为 $-10 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 时,测量不同环境温度、不同转速时的平均阻力矩如图9所示。

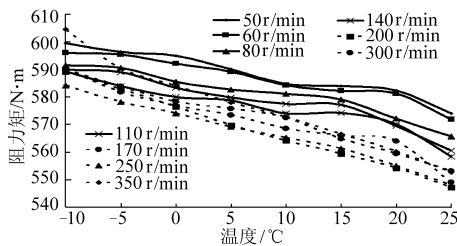


图9 起动阻力矩与环境温度的关系

Fig. 9 Relation between starting resistance torque and temperature

图9是起动阻力矩与环境温度的关系,如图所示,50~170 r/min低速时,柴油机未着火,由于润滑油温度下降,粘度增大,起动阻力矩逐渐增大;速度越低时,产生的静摩擦力矩越大,柴油机不容易被拖动。200~350 r/min时,柴油机已经着火,柴油机飞

轮转速上升,飞轮转动惯量矩增大,产生的起动阻力矩增大,因此柴油机的阻力矩随环境温度呈近似线性变化关系。在 0°C 以下,环境温度每降低 5°C ,阻力矩增加 $3 \sim 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

图10为不同环境温度时,起动阻力矩与转速的关系。转速高于200 r/min时,平均起动阻力矩随转速的环境温度增大。转速提高50 r/min,平均起动阻力矩增加 $4 \sim 11 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

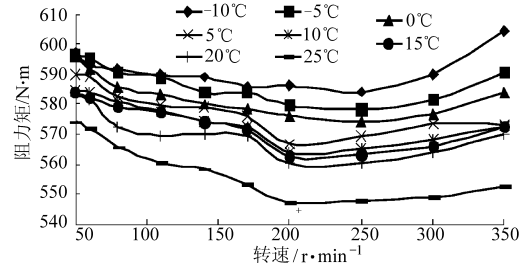
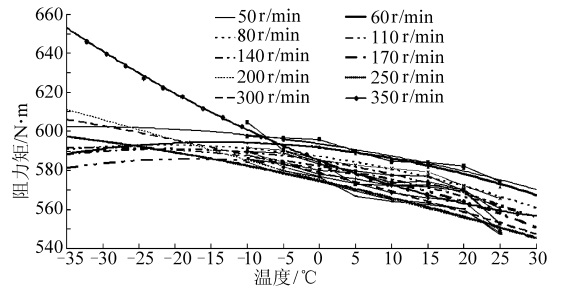


图10 起动阻力矩与转速的关系

Fig. 10 Relation between speed and starting resistance torque

在严寒条件下,可以运用经验公式,预测更低环境温度时柴油机的起动阻力矩。环境温度为 -35°C 的预测柴油机起动阻力矩,如图11所示。

图11 -35°C 柴油机起动阻力矩预测曲线Fig. 11 Predicting starting resistance torque at -35°C

2.4 ISG柴油机起动试验与分析

在环境温度 -10°C 时,进行ISG柴油机起动试验,试验结果如图12所示。

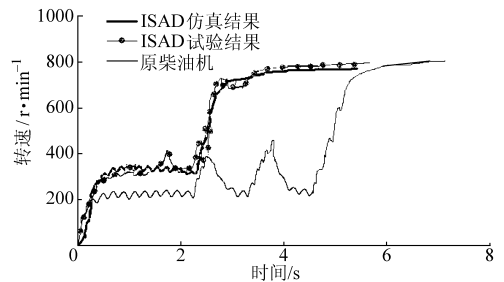


图12 ISG柴油机起动转速曲线

Fig. 12 Starting speed of ISG diesel engine under low temperature

通过与原柴油机起动过程的对比可以看出,原柴油机从静止到700 r/min怠速起动时间为5.5 s;采用ISG技术后,起动着火转速可提高到300 r/min以上,从静止到700 r/min怠速的起动时间为2.7 s。

与原有柴油机相比,ISG柴油机着火转速高,起动时间短,且起动过程中转速波动较小。

环境温度 -25°C 时,使用不同型号的蓄电池组,进行起动柴油机的试验,试验结果见表2。

表2 -25°C 时不同ISG电机的起动试验
Tab.2 Starting experiment of different ISG motor at -25°C

起动电机	温度/ $^{\circ}\text{C}$				蓄电池	电压/V		柴油机最高转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	起动时间/s	起动与否
	机油	进气	冷却液	蓄电池		初始	最低			
兰州环电	-25.7	-25.5	-25.3	-25.2	都灵 V	11.42	8.1	N/A	>30	否
	-25.1	-25.5	-24.0	-24.8	都灵 IV	12.66	8.3	1070	20	是
ISG	-24.7	-25.1	-25.8	-25.2	德意	12.66	8.3	104	>30	否
	-24.5	-25.4	-25.2	常温	军车	11.42	8.6	909	20	是
进口 ISG	-24.5	-25.3	-24.1	-25.8	军车	12.61	7.99	1186	18	是
	-24.5	-26.0	-25.5	常温	都灵 V	12.76	8.8	858	35	是

可以看出,当蓄电池温度为 -25°C 时,起动会失败。这是由于蓄电池处于低温状态时,ISG电机的输入电压不足,无法提供足够的转矩起动柴油机。

3 结论

(1)对起动系统的蓄电池极板构造、放电电流、电解液温度、电解液密度等结构参数进行调整,可以改善蓄电池的低温性能,提高蓄电池的容量。通过改进前后的蓄电池的柴油机低温起动试验,可以看出 -25°C 时,改进后蓄电池最大起动电流为678 A,最低起动电压为8.7 V,ISG电机的输出转矩比改进前的增加了25%,起动时间缩短了13%。

(2)蓄电池电压一定时,ISG电机输出功率随温

度的下降而下降,输出转矩基本不变;同一温度,ISG电机的输出功率、转矩随蓄电池电压的下降而下降;采用经验公式可以预测更低环境温度下(-35°C)ISG柴油机的起动阻力矩。

(3)由ISG电机拖动柴油机起动,柴油机着火时的转速大幅度提高,达350 r/min以上。与原有柴油机相比,转速响应快,起动时间短,且起动过程中转速过渡较为平滑,有利于提高起动工况下的动力性、改善排放性。

(4)ISG柴油机在 -25°C 低温工作时,由于蓄电池的受环境温度的影响,提供给ISG电机的端电压不足,无法产生足够的转矩克服阻力矩来起动柴油机,可能造成柴油机起动失败。

参 考 文 献

- Lee Youn Hee, Nasiri Adel. Analysis and modeling of conductive EMI noise of power electronics converters in electric and hybrid electric vehicles[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC. Austin:IEEE,2008:1952~1957.
- Nady Boules. Design optimization of permanent magnet DC motors[C]. IEEE, 1990(4):786~792.
- Xiuhe Wang, Song-Yop Hahn. Performance analysis and optimization of a permanent magnet starter motor with auxiliary poles by FEM[C]. IEEE, 2003(3):1476~1479.
- 敖建平,孙国忠.添加剂和极板结构对铅电池冷起动性能的影响[J].蓄电池,1996(3):29~36.
- 李帅,彭国平,鱼振民. Ansoft EM 在电机设计中的应用[J].微电机,2004,37(4):52~54.
Li Shuai, Peng Guoping, Yu Zhenmin. The application of Ansoft EM in motor design[J]. Micromotors, 2004,37(4):52~54. (in Chinese)
- Kazuya Tajiri, Yuichiro Tabuchi, Fumio Kagamib, et al. Effects of operating and design parameters on PEFC cold start [J]. Journal of Power Sources, 2007(1):279~286.
- 张京永,杨福源,欧阳明高.高压共轨柴油机起动过程特点与优化方法的研究[J].内燃机学报,2003,21(3):201~206.
- 王育辉,高国珍,骆旭薇,等.电控高压共轨柴油机匹配的研究[J].内燃机工程,2006,11(3):69~72.
Wang Yuhui, Gao Guozhen, Luo Xuwei, et al. Research on an electronically controlled high pressure common rail system match for a DI diesel [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering,2006,11(3):69~72. (in Chinese)
- Vaez-Zadeh S, Ghasemi A R. Design optimization of permanent magnet synchronous motors for high torque capability and low magnet volume [J]. Electric Power Systems Research, 2005(74):307~313.

表2 不同转速下海带粉碎效果对比

Tab.2 Comparison of crushing effect of kelp under

different speeds

 μm

叶轮转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$d(0.1)$	$d(0.5)$	$d(0.9)$
6 000	43.948	110.362	270.007
8 000	17.516	96.831	231.399

6 结论

(1) 确定了高速切割粉碎机关键部件粉碎室内的叶轮叶片形状,对不同形状叶片、刀片偏转角度的模型在转子转速为6 000 r/min时的流场进行数值模拟,分析了静压场、速度场的分布情况,揭示了粉

碎室内的吸入流场、切割流场,表明这种基于切割原理的粉碎设备既具有泵送功能,又有较强的切割粉碎作用。

(2) 通过对粉碎室不同定、转子结构数值模拟的性能参数比较,得出转子为直叶片式叶轮,刀片的偏转角度为 2° 时产生的切割粉碎流场最有利于切割粉碎。

(3) 通过对不同叶轮转速的流场分析,认为转子转速对物料运动速度、压力、最大剪应变率的影响呈线性关系。

(4) 高速切割粉碎机对物料具有良好的粉碎效果,提高叶轮转速可以明显改善粉碎效果。

参 考 文 献

- 张裕中. 食品加工技术装备[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007:138~151.
- Pankaj Sharma, Chakkaravarthi A, Vasudeva Singh, et al. Grinding characteristics and batter quality of rice in different wet grinding systems[J]. Journal of Food Engineering, 2008,88(4):499~506.
- 万燕君,吴红霞,张裕中. 受控切割超细粉碎机理及相关参数分析[J]. 食品工业,2007(1):51~52.
Wan Yanjun, Wu Hongxia, Zhang Yuzhong. The analysis of the principle and correlative parameters in controlled cutting superfine grinding[J]. The Food Industry,2007(1):51~52. (in Chinese)
- Anders Darelus, Anders Rasmuson, Berend van Wachem, et al. CFD simulation of the high shear mixing process using kinetic theory of granular flow and frictional stress models[J]. Chemical Engineering Science,2008,63(8):2 188~2 197.
- Barailler F, Heniche M, Tanguy P A. CFD analysis of a rotor-stator mixer with viscous fluids[J]. Chemical Engineering Science, 2006,61(9):2 888~2 894.
- Urschel Corporation. Comitrol[®] processor user guide[M]. Urschel, 2003.
- Jan Abom. High-speed mill for grinding biomass and like material:USA,4621775[P]. 1986-11-11.
- Dong L, Johansen S T, Engh T A. Flow induced by an impeller in an unbaffled tank—II. Numerical modeling[J]. Chemical Engineering Science,1994,49(20):3 511~3 518.
- 赵浩,张玲玲,张裕中. 农产品高速切割粉碎机理及设备结构参数分析[J]. 贵州农业科学,2008,36(4):181~183.
Zhao Hao, Zhang Lingling, Zhang Yuzhong. Analysis on the mechanism and structural parameters of high-speed comminution for materials of agricultural products[J]. Guizhou Agricultural Sciences,2008,36(4):181~183. (in Chinese)
- 孔繁余,吕毅,黄建军,等. 变螺距诱导轮流场的数值模拟[J]. 农业机械学报,2007,38(10):45~48.
Kong Fanyu, Lü Yi, Huang Jianjun, et al. Numerical simulation on flow field of variable-pitch inducers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(10):45~48. (in Chinese)
- 王福军. 计算流体动力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000:266~268.
- 欧舒 J Y. 流体混合技术[M]. 王英琛,林猛流,施力田,等,译. 北京:化学工业出版社,1991.

(上接第13页)

- Heinen N A. Instantaneous engine friction torques, its components and piston assembly friction[R]. Final Report Submitted to USDOE,1992:110~115.
- 胡明江,王忠,祁利巧. 车用蓄电池低温起动容量的研究[J]. 车用发动机,2008,6(3):13~16.
Hu Mingjiang, Wang Zhong, Qi Liqiao. Research on low-temperature starting capacity of vehicle batteries [J]. Vehicle Engine, 2008,6(3):13~16. (in Chinese)
- 庄杰,杜爱民,许科. ISG型混合动力汽车柴油机启动过程分析[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)