

变速柴油发电机组最佳运行转速研究

杨 峰, 曾宪友, 刘佳彬, 周晓洁, 孟嗣斐

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 燃油经济性好是变速柴油发电机组的一大优势, 而柴油机运行转速与燃油消耗率密切相关。以变速柴油发电机组为研究对象, 建立了变速柴油发电机组的数学模型, 以燃油消耗率最低为准则, 用数学模型寻优和试验数据寻优两种方法开展了变速柴油发电机组的最佳运行转速研究; 并进行了变速柴油发电机组油耗试验。试验结果表明: 在最佳运行转速曲线上运行的变速柴油发电机组的燃油消耗率小于恒速模式下运行时的燃油消耗率; 试验数据寻优得到的最佳运行转速曲线的节油性更好。

关键词: 柴油发电机组; 变速; 燃油消耗率

中图分类号: TK421 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)02-0015-05

Study on the Optimum Speed of Variable-Speed Diesel Gensets

Yang Feng, Zeng Xianyou, Liu Jiabin, Zhou Xiaojie, Meng Sifei

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Good fuel economy is a great advantage of variable-speed gensets, and the speed of diesel engine is closely related to fuel consumption. To study the variable-speed diesel gensets, mathematical model of variable-speed diesel genset was built up. With the methods of mathematical model calculation and test data optimization, the research on optimum speed of variable-speed gensets was conducted. Moreover, the fuel consumption test of variable-speed diesel gensets was carried out. The test results indicate that the fuel consumption rate of variable-speed diesel gensets running at optimum speed is lower than that of running at constant speed, and optimum speed curve got from test data optimization is more fuel-efficient.

Key words: diesel gensets; variable-speed; fuel consumption

0 引 言

变速发电技术是一种新型的发电技术, 目前已广泛应用于风力发电、航空发电和汽车发电等领域^[1,2]。近年来, 变速发电技术被引入到柴油发电机组中, 因其良好的经济性、减振降噪性和低维护费用而得到迅速发展。

目前, 国内外针对变速柴油发电机组进行了许多研究, 诸如变频器控制策略、变频器性能优化、柴油发电机组与风力发电联合运行等^[3-5], 但是对

变速柴油发电机组中柴油机的运行转速的研究相对较少。变速发电的一大优势就是燃油经济性好, 而柴油机运行转速与燃油消耗率密切相关。为了最优化变速柴油发电机组的燃油消耗率, 须对变速柴油发电机组的最佳运行转速进行研究。

本文建立了变速柴油发电机组的数学模型, 根据试验数据确定数学模型的参数。基于该模型计算了全负荷工况下的柴油机最佳运行转速; 又根据试验数据, 得到各负荷下的最佳运行转速, 形成了变速柴油发电机组的最佳运行转速曲线。最后进行了

二种最佳运行曲线的节油性试验验证。

1 变速柴油发电机组的组成与工作原理

变速柴油发电机组主要由柴油机、异步发电机、变频器和节能控制单元组成，其系统框图如图 1 所示。柴油机为 TBD234V6 型辅机用柴油机，额定转速为 $1\,500\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ ，全负荷最低转速 $1\,000\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。变速柴油发电机组的额定功率为 $150\ \text{kW}$ 。

在变速柴油发电机组中，柴油机转速随负荷变化而变化，柴油机拖动异步发电机发电，变频器将异步发电机发出的变频变压的电能转换成恒频恒压的电，同时给异步发电机提供励磁。节能控制单元是变速柴油发电机组转速控制的核心，节能控制单元从变频器采集负载功率信号，根据最佳运行转速曲线公式计算柴油机的最佳运行转速，并调节柴油机的运行转速。

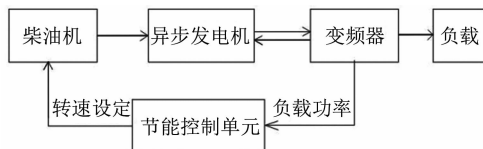


图 1 变速柴油发电机组系统框图

2 变速柴油发电机组数学模型

2.1 柴油机数学模型

对于变速柴油发电机组最佳运行转速的研究，主要关注柴油机的动力输出特性，并不关注柴油机的运行原理。为了简化分析的难度，不对其增压、进排气和燃烧过程做详细的分析和建模，而是采用线性化的建模方法。柴油机的动力输出特性主要与柴油机的循环喷油量和转速有关^[6]，因此该柴油机数学模型建立的是柴油机转矩与循环喷油量和转速的关系。

图 2 为稳定工况下，变速柴油发电机组在不同转速下单缸循环喷油量与柴油机输出转矩的试验数据和拟合曲线。由拟合曲线可以看出：在相同转速下，柴油机输出转矩与循环喷油量近似呈线性关系。本文研究的变速发电机组的柴油机为 6 缸机，因此相同转速下柴油机输出转矩与循环喷油量的关系可用下式表示：

$$T = 6(ad + b) \quad (1)$$

式中： T 为柴油机输出转矩， $(\text{N} \cdot \text{m})$ ； d 为单缸循环喷油量， mg ； a 、 b 为系数。

对不同转速下的系数 a 和系数 b 进行分析，发现其与柴油机转速成线性关系，如图 3 所示。

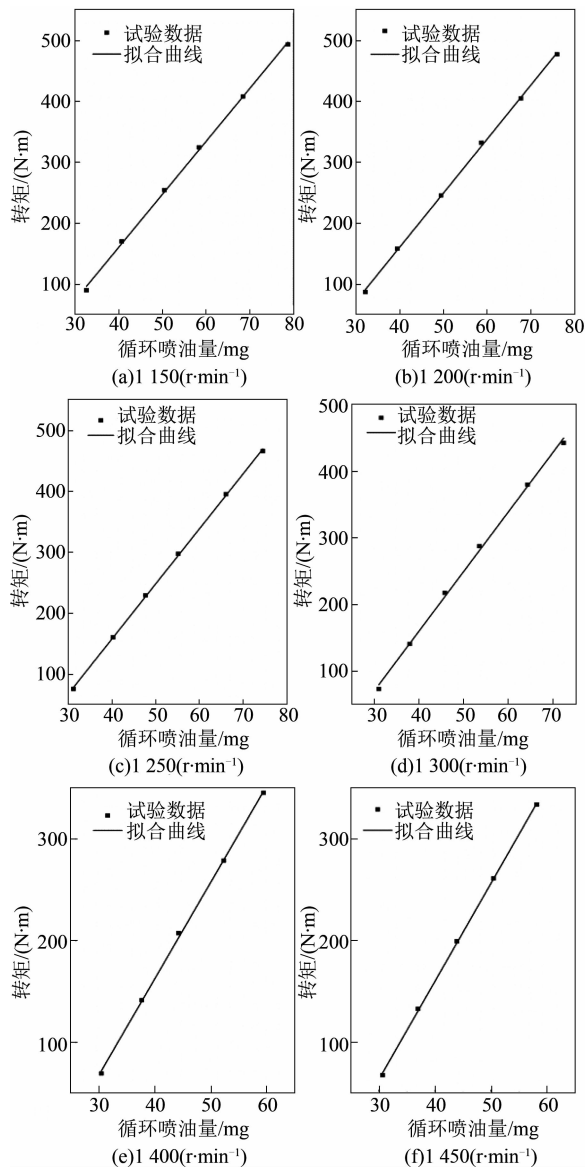


图 2 不同转速下转矩与循环喷油量的关系

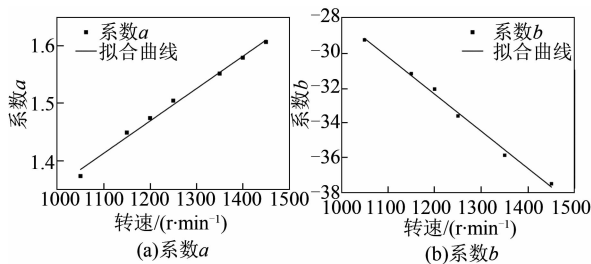


图 3 系数 a 和系数 b 与转速的关系

系数 a 和系数 b 与转速 n 的关系可用下式表示：

$$a = 0.000\,55n + 0.807\,02 \quad (2)$$

$$b = -0.037n - 12.767\,66 \quad (3)$$

为了方便分析，用柴油机角速度 $\omega\ (\text{rad} \cdot$

s^{-1}) 代替柴油机转速 n , 则系数 a 和系数 b 与角速度 ω 的关系如下式所示:

$$\omega = \pi n / 30 \quad (4)$$

$$a(\omega) = 0.00527\omega + 0.80702 \quad (5)$$

$$b(\omega) = -0.3536\omega - 12.76766 \quad (6)$$

因此稳定工况下, 柴油机输出转矩 T 与循环喷油量 d 和角速度 ω 的关系为:

$$T = 6((a_1\omega + a_2)d + b_1\omega + b_2) \quad (7)$$

式中: a_1 为 0.00527; a_2 为 0.80702; b_1 为 -0.3536; b_2 为 -12.76766。

2.2 异步发电机数学模型

异步发电机的输入功率是柴油机的输出机械功, 其输出功率是三相电压和电流形式的电能。异步发电机将机械功转换为电能时会有一定的损耗, 其损耗主要有定子铜损、转子铜损、定子铁心损耗、风摩损耗和杂散损耗^[7]。

异步发电机的数学模型由异步发电机的等效电路模型推导, 异步发电机的等效电路模型与异步电机类似, 如图4所示。但模型中感应电动势方向、定子电流和电压方向与异步发电机相反。等效电路模型中的定子阻抗、转子阻抗和激磁阻抗等参数如表1所示, 表中所有参数都是在 50 Hz 条件下获得。

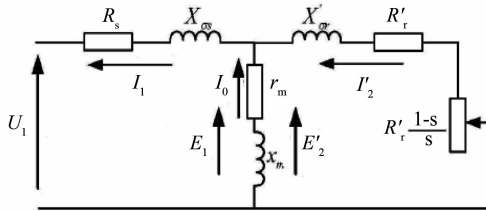


图4 异步发电机的等效电路模型

表1 异步发电机等效电路模型参数

定子电阻 R_s/Ω	0.0134
折算转子电阻 R'_r/Ω	0.013
定子漏抗 X_{as}/Ω	0.125
折算转子漏抗 X'_{ar}/Ω	0.262
串联激磁电阻 r_m/Ω	1.06
串联激磁电抗 x_m/Ω	9.67
转差率 S	0.74%

定子三相中的铜损为:

$$P_{SL} = 3I_1^2 R_s \quad (8)$$

转子电路中的实际电阻损耗为:

$$P_{RL} = 3I_r'^2 R_r \quad (9)$$

由于等效电路模型中折算转子电阻时功率保持不变, 转子铜耗也可以表示为:

$$P_{RL} = 3I_2'^2 R_r' \quad (10)$$

感应发电机的铁心损耗、风摩损耗、杂散损耗

均随转速变化, 但总值被认为是恒定的, 一般占输入功率的 2%^[7]。异步发电机的输出功率 P_{out} 和输入功率 P_{in} 的关系为:

$$P_{out} = P_{in} - P_{SL} - P_{RL} - P_{其他} \quad (11)$$

3 数学模型寻优

上文已得到了稳定工况下柴油机输出转矩 T 与单缸循环喷油量 d 和角速度 ω 的关系, 则单缸循环喷油量 d 可表示为:

$$d = \frac{T/6 - b_1\omega - b_2}{a_1\omega + a_2} \quad (12)$$

变速柴油发电机组的柴油机为 6 缸四冲程发动机, 则每小时燃油消耗量 m_f ($g \cdot h^{-1}$) 为:

$$m_f = 6 \frac{3600}{1000 \times 4\pi} d\omega = \frac{5.4}{\pi} d\omega \quad (13)$$

将式(12)带入上式, 得

$$\begin{aligned} m_f &= \frac{5.4}{\pi} \frac{T/6 - b_1\omega - b_2}{a_1\omega + a_2} \omega \\ &= \frac{5.4}{\pi} \frac{P_d/6 - b_1\omega^2 - b_2\omega}{a_1\omega + a_2} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: P_d 为柴油机输出功率, W 。

化简 m_f , 有:

$$m_f = \frac{5.4}{\pi} [C_1\omega(a) + C_2 + \frac{P_d/6 + C_3}{\omega(a)}] \quad (15)$$

其中: $C_1 = \frac{-b_1}{a_1^2}$;

$$C_2 = \frac{2a_2b_1}{a_1^2} - \frac{b_2}{a_1};$$

$$C_3 = -\frac{b_1a_2^2}{a_1^2} + \frac{b_2a_2}{a_1};$$

$$\omega(a) = a_1\omega + a_2。$$

计算最优运行转速, 就是计算燃油消耗量最小的转速点, 即最优化目标函数 m_f 。

$$m_{fmin} = \min\{m_f(\omega(a), P_d)\} \quad (16)$$

函数 m_f 中的系数 C_1 、 C_3 和 $\omega(a)$ 均大于 0, 因此函数 m_f 的最小值, 可由下式求得:

$$\frac{\partial m_f}{\partial \omega(a)} = C_1 - \frac{P_d/6 + C_3}{\omega(a)^2} = 0 \quad (17)$$

$$\omega(a) = \sqrt{\frac{P_d/6 + C_3}{C_1}} \quad (18)$$

函数 m_f 在 $\omega(a) = \sqrt{(P_d/6 + C_3)/C_1}$ 时取得最小值, 则最佳角速度 ω_{opt} 为:

$$\omega_{opt} = \frac{\omega(a) - a_2}{a_1} \quad (19)$$

最佳运行转速 n_{opt} 为:

$$n_{\text{opt}} = \frac{30}{\pi} \frac{\sqrt{(P_d/6 + C_3)/C_1} - a_2}{a_1} \quad (20)$$

在变速柴油发电机组中,异步发电机和变频器的损耗也是不能忽略的。异步发电机和变频器损耗的计算是一个复杂的过程,异步发电机的损耗随转速和负载的变化而变化,变频器的损耗与变频器导通时间和开关频率有关。为了简化计算,认为异步发电机和变频器的总效率 η 为恒定值 0.85,则负载功率 P_1 可表示为:

$$P_1 = \eta P_d \quad (21)$$

于是就可以得到用负载功率表示的最佳运行转速 n_{opt} :

$$n_{\text{opt}} = \frac{30}{\pi} \frac{\sqrt{(P_1/6\eta + C_3)/C_1} - a_2}{a_1} \quad (22)$$

将求得的系数 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 代入上式,可得最佳运行转速的计算公式:

$$n_{\text{opt}} = \frac{30}{3.14} \frac{\sqrt{P_1/5.1 + 10\,248/12\,733} - 0.807}{0.005\,27} \quad (23)$$

图 5 为根据最佳运行转速计算公式得到的最佳运行转速曲线。因柴油机持续运行的转速范围为 $1\,000 \sim 1\,500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$,而根据数学模型计算出的部分最佳运行转速超出了柴油机的正常运行范围,这和柴油机实际运行情况不符。为了保证柴油机的正常运行,在设计最佳运行转速曲线时,对于低于 $1\,000 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 的功率点按 $1\,000 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 运行,高于 $1\,500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 的功率点按 $1\,500 \text{ (r} \cdot \text{min}^{-1})$ 运行。设计的实际运行转速曲线如图 5 中虚线所示。

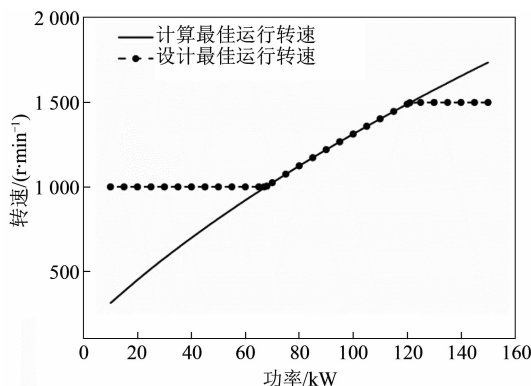


图 5 计算最佳运行转速曲线

4 试验数据寻优

为了提高最佳运行转速的准确性,还通过试验数据寻优的方法进行了最佳运行转速的研究。对变速柴油发电机组进行万有特性试验,测量变速柴油发电机组在不同负载、不同转速下的燃油消耗量。

由于试验中不能很精确地控制负载值,也就不能通过直接比较相同负载的燃油消耗量大小来选取最佳运行转速。本文将功率相近的功率点认为是同一功率等级,通过比较各功率等级下各转速的机组燃油消耗率大小,选取机组燃油消耗率最小的转速点为最佳运行转速。各功率等级下机组燃油消耗率与转速的关系如图 6 所示。

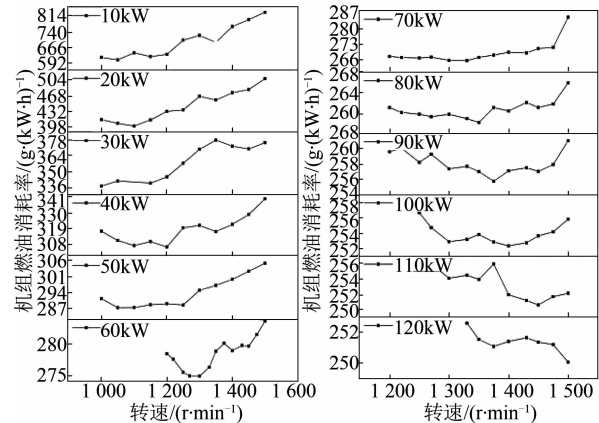


图 6 机组燃油消耗率与转速的关系

根据燃油消耗率最低原则,选取各功率等级下油耗最低的转速点为最佳运行转速点,如表 2 所示。

表 2 最佳运行转速

功率/kW	最佳运行转速/ (r · min ⁻¹)	功率/kW	最佳运行转速/ (r · min ⁻¹)
10	1 050	80	1 350
20	1 100	90	1 375
30	1 150	100	1 400
40	1 200	110	1 450
50	1 250	120	1 500
60	1 300	130	1 500
70	1 330	140	1 500

根据最佳运行转速表,用分段拟合的方法得到最佳运行转速 n_{opt} 与负载功率 P_{II} 之间有如下关系:

$$\begin{cases} n_{\text{opt}} = 1\,050 & P_{\text{II}} < 10 \\ n_{\text{opt}} = 5P_{\text{II}} + 1\,000 & 10 \leq P_{\text{II}} \leq 60 \\ n_{\text{opt}} = 0.03P_{\text{II}}^2 - 2.1P_{\text{II}} + 1\,322 & 60 < P_{\text{II}} < 120 \\ n_{\text{opt}} = 1\,500 & P_{\text{II}} \geq 120 \end{cases} \quad (24)$$

试验数据寻优得到的最佳运行转速曲线和拟合的最佳运行转速曲线如图 7 所示。

5 试验验证

变速柴油发电机组分别运行在变速模式和恒速

模式, 变速模式分为变速模式 1 和变速模式 2。变速模式 1 按数学模型寻优得到的最佳运行转速曲线运行; 变速模式 2 按试验数据寻优得到的最佳运行转速曲线运行。恒速模式下变速柴油发电机组的转速恒为 $1\,500\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 。三种模式下的机组燃油消耗率情况如图 8 所示。

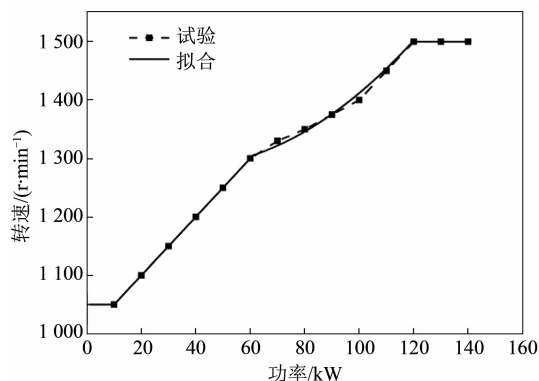


图 7 最佳运行转速曲线

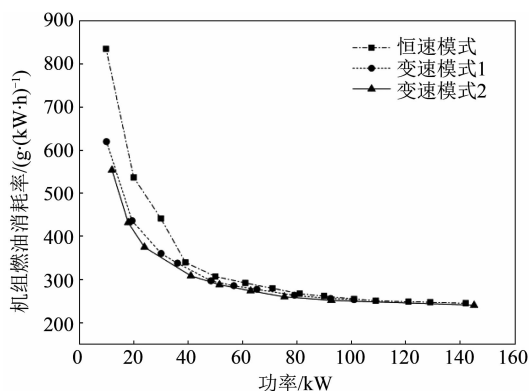


图 8 不同运行模式的机组燃油消耗率

从图 8 可以看出: 负载功率小于 $100\ \text{kW}$ 时, 变速模式 1 和变速模式 2 下的变速柴油发电机组的燃油消耗率均低于恒速模式下的燃油消耗率。功率越小时, 机组燃油消耗率减小越明显。在 13% 负荷, 即 $20\ \text{kW}$ 负载时, 相较于恒速模式, 变速模式 1 的机组燃油消耗率降低了 18.7%, 变速模式 2 降低了 19.4%; 在 40% 负荷, 即 $60\ \text{kW}$ 负载时, 相较于恒速模式, 变速模式 1 的机组燃油消耗率降低了 4.3%, 变速模式 2 降低了 6.6%。在负载功率高于 $100\ \text{kW}$ 时, 三种运行模式下的机组燃油消耗率基本相近。这是因为在高负载工况下, 变速模式下的变速柴油发电机组的运行转速和恒速模式下

的运行转速相近, 甚至相同, 所以三种模式下的机组燃油消耗率相差不大。

从不同运行模式下机组燃油消耗率情况来看, 按最佳运行转速曲线运行比恒速模式下运行更加节油, 验证了最佳运行转速曲线具有较好的节油性。比较变速模式 1 和变速模式 2 的机组燃油消耗率情况, 变速模式 2 的油耗更低, 说明试验数据寻优得到的最佳运行转速曲线节油性更好。

6 结 论

本文对变速柴油发电机组中柴油机的最佳运行转速进行了研究, 建立了变速柴油发电机组的数学模型并计算了最佳运行转速; 同时通过试验数据寻优的方法得到了最佳运行转速。变速柴油发电机组油耗试验结果表明: 在最佳运行转速曲线上运行, 变速柴油发电机组的燃油消耗率均小于恒速运行模式; 试验数据寻优得到的最佳运行转速曲线的节油效果优于数学模型寻优得到的最佳运行转速曲线的节油效果。

参考文献

- [1] DENGLER P, GEIMER M, ZAHORANSKY R. Potential of reduced fuel consumption of diesel-electric APUs at variable speed in mobile applications [C]. SAE technical paper 2011 (24): 75-84.
- [2] 艾斯卡尔. 变速恒频交流励磁风力发电机系统及其控制原理研究 [D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] 张玉峰. 改善 VSCFDG 运行性能的控制技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [4] LEUCHTER J, REFUCHA V, KRUPKA Z, et al. Dynamic behavior of mobile generator set with variable speed and diesel engine [C]. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007.
- [5] LEE J H, LEE S H, SUL S K. Variable-speed engine generator with supercapacitor: Isolated power generator system and fuel efficiency [C]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45 (6): 2130-2135.
- [6] 刘雨. 船舶柴油发电机组的建模与智能控制的仿真研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2002.
- [7] CHAPMAN S J. 电机学 [M]. 2 版. 刘新正, 苏少平, 高琳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2012.