

船用中速柴油机加载过程油气匹配控制策略研究

钱正彦¹, 杨建国^{1,2}, 胡 颖¹, 余永华^{1,2}, 王红新³

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063; 2. 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 武汉 430063; 3. 陕西柴油机重工有限公司, 兴平 713105)

Study on the Air-Fuel Ratio Matching Strategy of a Marine Medium Speed Diesel Engine during its Loading Process

QIAN Zhengyan¹, YANG Jianguo^{1,2}, HU Ying¹, YU Yonghua^{1,2}, WANG Hongxin³

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Key Laboratory of Marine Power Engineering Technology Transportation Industry, Wuhan 430063, China;
3. Shaanxi Diesel Engine Heavy Industry Co., Ltd., Xingping 713105, China)

Abstract: In order to optimize the speed characteristics of a diesel engine during the loading process, the boost pressure change characteristics of a marine medium speed diesel engine with high pressure air injection at the end of the turbocharger compressor blade were studied. According to the dynamic characteristics of the diesel engine's unbalanced torque, a speed control strategy of air-fuel ratio matching in the diesel engine transient loading process was proposed using improved PID control method which was suitable for the time-lag characteristics of the diesel engine. Experimental results show that the control strategy of air-fuel ratio matching of the diesel engine with high pressure air injection at the end of the turbocharger compressor blade can optimize the transient speed regulation from 4.9% to 3.8%, and the speed recovery time from 3.1 s to 2.0 s during the loading process of the diesel engine at the 0% to 50% load, while at the 50% to 100% load, the transient speed regulation can be optimized from 2.9% to 2.3%, and the speed recovery time from 2.4 s to 1.8 s.

摘要: 根据柴油机加载过程转速调节受增压空气压力抑制的特点,研究了船用中速柴油机瞬态加载过程用压气机叶片端高压空气喷射方式进行补气的增压压力变化特性,并根据柴油机电力矩不平衡产生的动态变化特点,结合适应柴油机时滞特性的比例-积分-微分(PID)控制方法,形成了柴油机瞬态加载过程油气匹配的调速控制策略。经某船用中速柴油机台架试验验证证实,采用加载过程压气机叶片端高压空气喷射方式进行补气的油气匹配控制策略,使柴油机0%~50%负荷加载过程瞬态调速率从4.9%优化至3.8%,稳定时间从3.1 s优化至2.0 s; 50%~100%负荷加载过程瞬态调速率从2.9%优化至2.3%,稳定时间从2.4 s优化至1.8 s。

关键词: 船用柴油机; 电子调速器; PID控制; 油气匹配

Key words: marine diesel engine; electronic governor; PID control strategy;
air-fuel ratio matching

DOI: 10.13949/j.cnki.njgc.2017.03.014

中图分类号: TK427

文献标识码: A

收稿日期: 2015-07-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51379169)

作者简介: 钱正彦(1985—),男,博士生,主要研究方向为柴油机监测、诊断与电子控制, E-mail: qizy@whut.edu.cn;

杨建国(联系人), E-mail: jgyang@whut.edu.cn。

0 概述

柴油机电子调速器具有转速调节精度高、响应速度快的优点,已广泛应用于船用柴油机的转速调节。国外电子调速控制技术较为成熟先进,其代表产品有美国 Woodward 公司及德国 HEINZMANN 公司的电子调速器;国内主要采用仿真技术研究电子调速器控制策略,自主开发的电子调速器控制器与柴油机的匹配研究则较少。哈尔滨工程大学、无锡油泵油嘴研究所等单位开展了船用电子调速器控制器的研制;相比船用柴油机,小型增压柴油机由于经常工作在瞬态工况而对调速过程具有更高的要求,国内外对其研究也较充分^[1-2]。船用柴油机的结构特点使其在负载突变过程中具备更大系统延时,因而其瞬态过程受到的限制更加突出。柴油机系统延时包括执行器延时、增压空气延时等,柴油机突加负载主要受增压空气供气不足的限制,突卸负载则主要受执行器响应延时和系统惯性等因素的限制。为了减少船用柴油机瞬态加载过程受增压空气压力的限制,拟采取瞬态加载过程压气机叶片端高压空气喷射补气方式提高增压空气压力(增压器转速)响应速率,以提高发动机的瞬态响应特性。通过研究船用柴油机负载突变过程增压空气延时与增压器补气特性,分析迟滞系统 PID 控制和增压空气对喷油的限制规律,制定调速过程的分段控制策略,最终在船用发动机台架试验验证瞬态加载过程补气控制的优越性。本文中所提及的瞬态加载过程压气机叶片端高压空气喷射补气是指:瞬态加载过程中转速低于标定转速一定量(本文中取 1%)时,打开补气电磁阀实现控制空气补气,补气形式如图 1 所示。

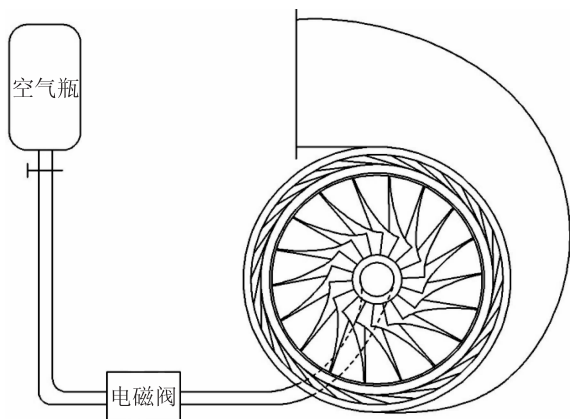


图 1 压气机叶片高压空气喷射补气方式

1 柴油机瞬态过程转速与增压特性

1.1 瞬态过程转速特性

瞬态过程转速特性(动态特性)是指柴油机所处

的平衡状态由于负载的变化而破坏后重新稳定到新平衡状态的过渡过程^[3]。

根据力矩的平衡原理,柴油机稳态工况的动力矩和阻力矩是相互平衡的,平衡状态破坏时调速器进行调节控制使柴油机达到新的平衡状态。柴油机电学平衡方程^[3]为:

$$J \frac{d\Delta\omega_g}{dt} = \Delta M_1 - \Delta M_2 \quad (1)$$

式中: J 为柴油机组转动惯量; $\Delta\omega_g$ 为柴油机曲轴转角的速度增量; ΔM_1 、 ΔM_2 分别为主力矩、负载阻力矩的增量。

式(1)中,转矩 M_1 随燃油变化关系式为^[4]:

$$M_1 = g_f H_\mu \eta_c \frac{30}{\pi n} \quad (2)$$

式中, g_f 为燃油消耗率; H_μ 为燃油热值; η_c 为机械效率; n 为柴油机转速。

根据式(1)和式(2)并结合表 1 所示的柴油机技术参数,可以计算负载突变瞬态过程转速变化规律。柴油机油门位置改变后至少有一个缸做功才能改变其力矩的输出状态,计算中 Δt 取两缸做功的间隔时间。

表 1 柴油机技术参数

项目	参数
功率/kW	540
$n/(r \cdot \min^{-1})$	1 000
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	50
压缩比	15.2
缸数	6
缸径/mm×行程/mm	160×240
$\Delta t/s$	0.02

1.2 增压空气特性

柴油机负载突加过程中增压空气的限制起着主导作用,为了改善柴油机瞬态过程调速特性需采取补气措施来减小增压空气的抑制作用。为了研究补气条件下调速控制策略,设计试验分别采集了 50% 负荷突加过程柴油机瞬态过程对增压器涡轮端喷射增压空气补气和非补气情况下的增压空气压力变化特性,以分析加载过程增压空气压力的延时、变化率等特征。结合柴油机稳态工作的增压压力和瞬态加载过程增压空气压力随时间的变化关系,计算出各油门位置(负荷)的油量增量上限。

图 2 为柴油机 1 000 r/min,0% 负荷时突加 50% 负载过程的补气与非补气两种情况下的增压压力变化关系。其中,非补气情况下增压空气响应延时时

间大约为 0.5 s,补气情况下压力响应延时可忽略。为了满足后续调速控制研究的需要,拟合了柴油机 0% 负荷突加 50% 负载过程中补气情况下的增压空气变化关系式,作为油量增量限制的依据。根据柴油机特性,只有在其低负荷情况下的加载过程才会出现严重的空气不足,高负荷情况下补气不会抑制调速特性,因此只分析 0%~50% 负载突加情况下的增压空气响应特性。在柴油机调速过程中,突加负荷调速控制受到增压空气压力限制(主要延时),突卸负荷和增压空气压力充足情况下调速控制受到柴油机系统响应延时限制,其控制策略需依据柴油机系统延时进行制定。

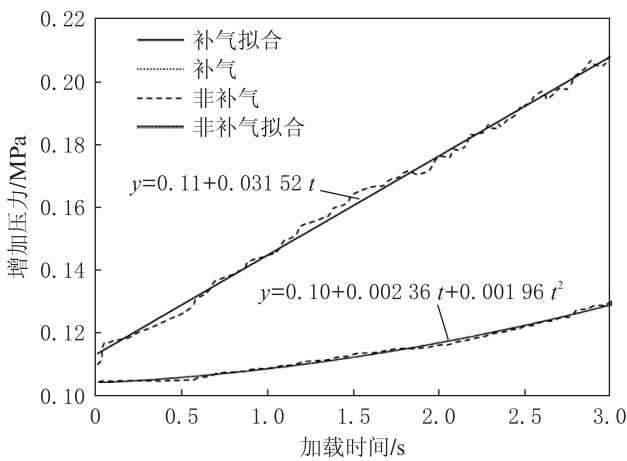


图2 柴油机突加 50% 负荷增压空气压力变化曲线

2 时滞系统 PID 及其调速控制策略

2.1 PID 控制与时滞分析

为了实现柴油机突卸负荷和保证增压空气压力充足,调速控制主要受系统响应延时的限制情况下的调速控制,对经典 PID 控制进行相应改进以适应柴油机调速控制。调速控制器应满足系统稳定时间和转速波动率等要求。为了更好地适应程序处理,选取增量型 PID 作为调速控制器的控制方法,如式(3)所示。

$$\Delta u(k) = K_p(e(k) - e(k-1)) + K_1 e(k) + K_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (3)$$

式中, $\Delta u(k)$ 为执行器控制信号输出增量; K_p 、 K_1 、 K_d 分别为比例、积分和微分系数; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 分别为当前与目标值的差值、上次与目标值的差值和上上次与目标值的差值。

为了明确 PID 控制应用于迟滞系统的参数稳定域,应用迟滞系统的 Hermite-Biehler 定理对滞后过

程进行分析。根据柴油机系统特性可用典型的二阶惯性环节描述其调速控制特性,其滞后的传递函数如式(4)所示^[5]。

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} e^{-Ls} \quad (4)$$

式中, ω_n 为无阻尼自然震荡角频率; ζ 为阻尼比; L 为滞后时间; s 为复变量。

柴油机系统为欠阻尼系统,分析二阶欠阻尼迟滞过程的 PID 控制特性,得出欠阻尼控制系统稳定的条件,如式(5)~式(7)所示^[5]。

$$4L\zeta\omega_n + L^2\omega_n^2 + 2 > 0 \quad (5)$$

$$\tan\alpha = \frac{2(1 + L\zeta\omega_n)}{\alpha^2 - L^2\omega_n^2 - 2L\zeta\omega_n} \alpha \quad (6)$$

$$-1 < K_p < K_{pu} = \frac{2\zeta}{L\omega_n} \alpha \sin\alpha + \left(\frac{\alpha^2}{L^2\omega_n^2} - 1 \right) \cos\alpha \quad (7)$$

式中, α 为相角裕度; K_{pu} 为 α 在区间 $(0, \pi)$ 内的最大值。

根据柴油机特性试验,滞后时间(调速器输出至转速变化的时间) L 由执行器延时、功率输出响应延时决定;震荡频率由惯性、执行器延时、功率输出响应延时共同决定;阻尼比 ζ 由柴油机机械结构、转速等决定。经试验测试得到 $L=0.02$ s, $\omega_n=54\pi$ rad/s, $\zeta=0.5$ 。结合式(5)~式(7)得出 $-1 < K_p < 10.8$ 。

为了实现柴油机瞬态调节对油量增量率的限制计算,调速控制器需采用恒定的调速控制时间间隔,且要求时间间隔不低于柴油机的系统响应时间。迟滞系统积分环节适用于用一段时间的平均转速来处理,且保证不重复积分。为了满足上述的控制特性,提出图3所示的 PID 控制方式。图3中, T_1 为比例、微分调节时间间隔, T_2 为积分调节时间间隔。则在保持 T_2 不变的情形下应根据目标转速改变 $\bar{e}(k)$ 的计算方式^[6]。

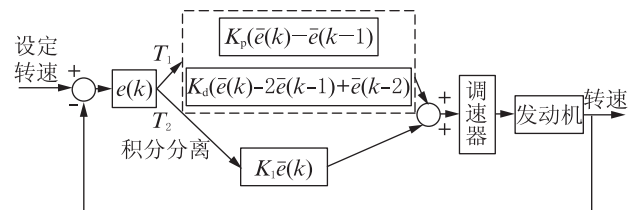


图3 积分分离 PID 控制图

图3中:

$$\bar{e}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=k}^{N+k} n_i - n_s \quad (8)$$

式中, $\bar{e}(k)$ 为调速计算间隔内平均转速与目标转速偏差; n_i 为柴油机瞬时转速; n_s 为设定目标转速; N 为平均转速采样数。

如果调节时间间隔 T_2 小于系统响应时间, 则比例调节可取 $T_1 \leq T_2$ 。若两次比例计算中插入一次比例计算后不影响计算结果, 则比例环节中的重叠计算不影响计算结果。假定在比例运算 $\bar{e}(k-c) - \bar{e}(k-a)$ 中插入 $\bar{e}(k-b)$ 计算点, 那么有 $(\bar{e}(k-c) - \bar{e}(k-b)) + (\bar{e}(k-b) - \bar{e}(k-a)) = \bar{e}(k-c) - \bar{e}(k-a)$, 即表明比例计算与调节频率无关, 只需时间间隔小于柴油机系统响应时间即可。

2.2 瞬态过程控制策略

如图 4 所示, 在柴油机负载突变过程中, 调速控制器的作用就是将燃油供应量从一个稳定状态调节至另一个稳定状态并保证转速恢复至目标值。以恒定的比例积分值来分析柴油机调速控制过程, 对于调速控制的比例环节而言, 其作用是快速响应转速变化并增加燃油供给量以抑制转速减小的趋势, 柴油机转速下降油量增加, 反之油量减小, 比例环节的最终输出结果为零, 如式(9)所示。

$$\sum \Delta u(k)_p = \sum K_p(\bar{e}(k) - \bar{e}(k-1)) = 0 \quad (9)$$

式中, $\sum \Delta u(k)_p$ 为瞬态过程比例调节输出的总燃油增量。

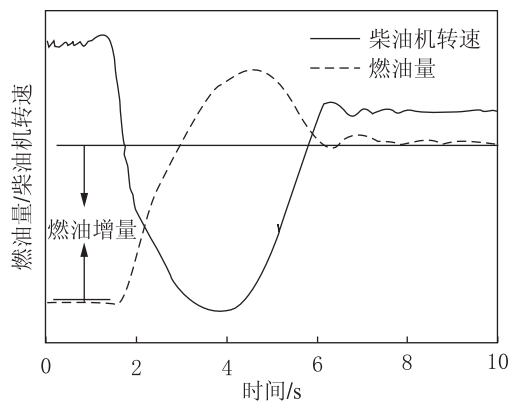


图4 柴油机瞬态加载过程PID调速燃油和转速关系示意图

在柴油机转速变化率为零的转折点, 燃油量增量是比例和积分共同作用的结果。在后续的转速回升过程中, 比例调节将之前的油量增量还原的同时, 积分调节因转速未到目标位置而继续增加供油量, 表明柴油机瞬态波动过程其燃油量的变化最终是积分的结果, 在给定调节时间的情形下则可推导出积分系数。

为了使柴油机瞬态调速过程保持其动力特性, 图4所示的比例环节各点油量需要保证正常的空燃比。

本文中取最低空燃比为1.2, 假设缸内进气质量与增压空气压力呈线性关系。基于上述假设, 根据图2所示的增压空气压力公式就可以换算出补气与非补气两种模式下的瞬态加载过程中缸内空气质量的变化关系。结合图5所示的稳定状态各负荷进气质量和图6所示稳态循环喷油量, 就可以计算从任一负荷点突加任意负荷情况下各自的最大喷油限制曲线。

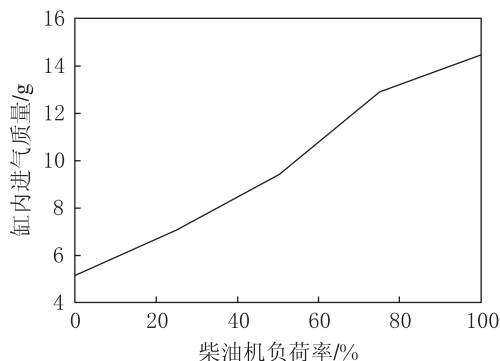


图5 柴油机各负荷稳态单缸进气质量

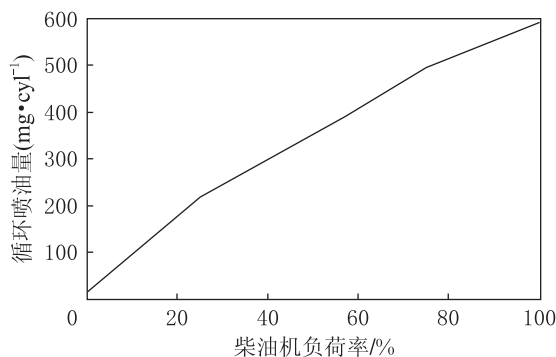


图6 各负荷稳态循环喷油量

根据上述方法, 分析得出非补气和补气两种情况下柴油机0%~50%负荷突加和50%~100%负荷突加的燃油限制公式, 分别如式(10)和式(11)所示。

$$F_{\max} = 29(t - 0.5) + F_{S\max} (t \geq 0.5) \quad (10)$$

$$F_{\max} = 229t + F_{S\max} \quad (11)$$

式中, $F_{\max}$ 为瞬态过程柴油机最大燃油限制量; $F_{S\max}$ 为静态下柴油机最大燃油限制量; t 为瞬态过程时间。

根据式(10)和式(11)绘出其负荷突加过程中的供油限制曲线, 如图7和图8所示。

对比图7和图8发现, 非补气情况下柴油机0%负荷突加50%负载过程和50%负荷突加50%负载过程中, 空气量增加至当前负荷目标燃油对应值的时间都是2.5s, 加载过程补气的情况下, 该时间缩短至0.3s, 说明瞬态加载过程补气极大地减少了增

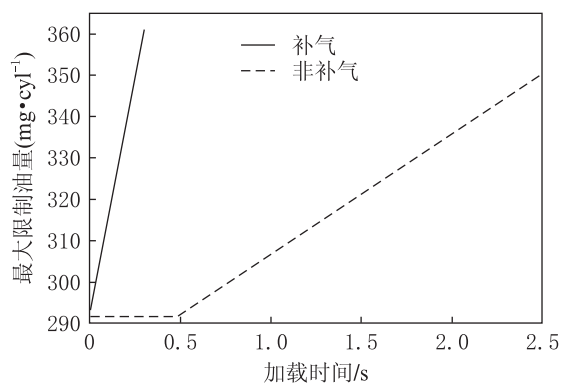


图7 燃油限制(柴油机0%负荷突加50%负载)

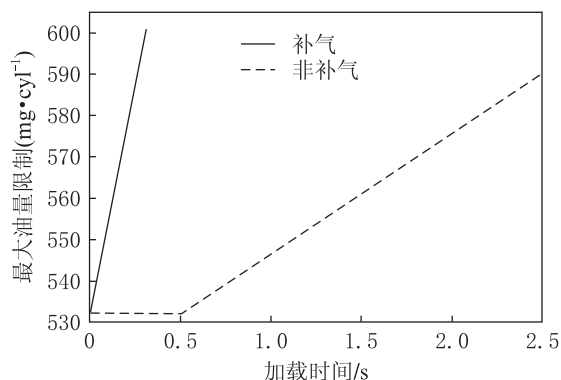


图8 燃油限制(柴油机50%负荷突加50%负载)

压空气不足的限制。

前文详细地分析了瞬态加载过程中非补气与补气情况下调速过程的燃油总量限制。为了进一步分析不同负荷柴油机调速过程的油量增量率，以柴油机从空载开始分段突加25%负载为例，根据图5、图6和图9计算出柴油机0%—25%—50%—75%—100%负荷突变过程中的静态可增量(不考虑增压器响应的燃油可增加量)，其计算结果如图10所示。

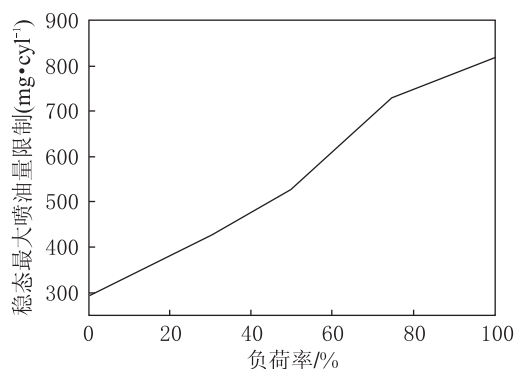


图9 各负荷稳态最大燃油限制

图10揭示了柴油机不同稳定状态时其静态可增加燃油量不一致的规律，即在不同负荷下的瞬态供油增量率不一致，这是PID增益设定的依据。在柴油机负载突加过程中，燃油供应值受瞬态过程的

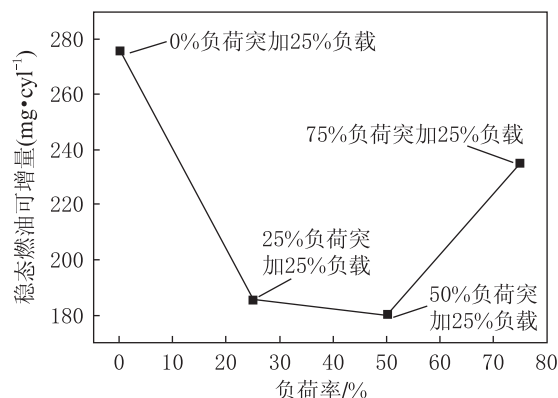


图10 稳态燃油可增量

最大供油限制线和静态燃油可增量限制，据此就可以得出突加负载调速过程的分段增益值。柴油机负载突卸则无需考虑增压空气压力的限制，其调速策略可与负荷突加一致。

柴油机75%负荷突加负载过程，增压空气量充足，油量增加不再受增压空气压力的限制，而柴油机100%负荷负载突卸过程中则需要大增益值以保证柴油机不出现飞车。此时调速控制主要受执行器响应延时、功率输出相应延时和惯性等因素限制。为保证系统稳定，其比例值应小于2.3节的分析结果。即柴油机低负荷区的燃油变化率受负载突加过程增压空气和过量空气系数的限制，高负荷区受柴油机系统延时特性和瞬态波动率(超速停车)的限制。

上述分析表明：柴油机PID分段参数根据柴油机所处状态进行设定，增压空气压力限制比系统响应延时的限制更大，在PID参数与增益设定过程中采用二者中更严格的限制。

为了保证柴油机的稳态调速特性，其PID参数值需要设置得较小，为了满足柴油机调速特性，在转速差大于稳态波动率时，PID参数乘上其倍率，这样既保证了稳态调速率达标又保证了稳定时间。根据柴油机上述特性，调速器输出控制所对应的油门齿条增量公式为：

$$\Delta \sum u(k) = \sum_{i=1}^{i=n} G_i [K_p (\bar{e}(k) - \bar{e}(k-1)) + K_I \bar{e}(k)] \quad (12)$$

式中， G_i 为调速控制增益值即调速控制策略； $\Delta u(k)$ 为调速控制的输出增量； K_p 与 K_I 分别为保证稳态调速率的比例、积分系数。

结合式(1)、式(2)、式(9)、式(12)和图10的参数，可计算得出各调速情况下柴油机基于PID调速

控制的分段增益值 G_i (限于篇幅, 计算过程略), 如图 11 所示。图 11 中上限限制线是依据柴油机时滞、负荷、转速特性计算得出的瞬态过程调速增益上限值。

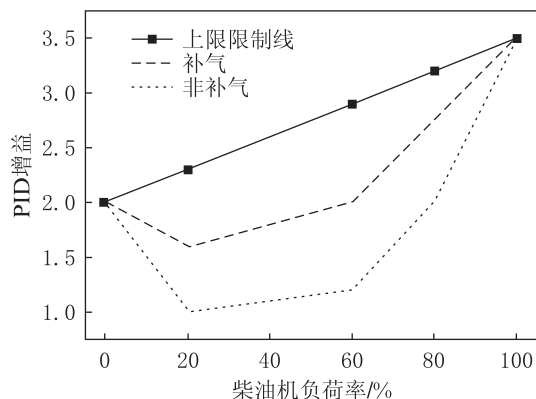


图 11 随负荷变化的调速控制 PID 增益

在柴油机 0%~25% 和 50%~75% 的负荷下比例值设置较大是因为该负荷段下的稳态空气量相对充足; 75% 以上不受增压空气的限制, 因此增益更大。由于补气极大地减少了瞬态加载过程增压空气对油量增量的限制, 因此采取补气措施的增益增大。

3 柴油机台架试验结果

为了验证加载过程控制策略的正确性并优化柴油机调速性能, 需要通过柴油机台架标定试验微调部分控制参数。通过标定最终得到柴油机瞬态过程非补气与补气情况下 100% 负荷突卸 100% 负载、0% 负荷突加 50% 负载过程和 50% 负荷突加 50% 负载过程瞬态响应的转速波动, 如图 12 所示。图 12 中瞬态加载过程补气与非补气控制策略的试验结果参数对比见表 2。试验结果满足船用柴油机调速技术要求 GB/T 3475—2008 中二级精度标准。试验证实调速控制策略的正确性及改进型 PID 控制的有效性, 并证实加载过程补气对调速效果具有明显的优化作用。

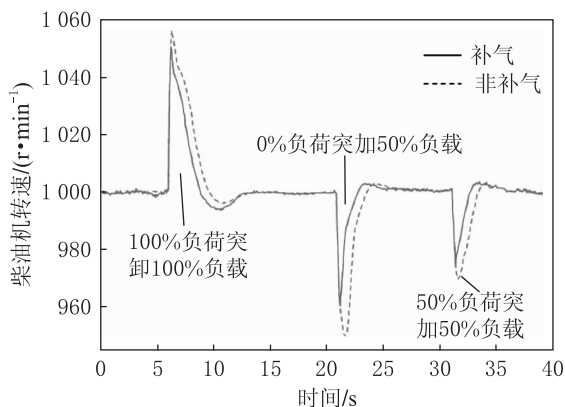


图 12 瞬态调速试验结果

表 2 调速特性试验值与 CCS 标准

试验内容	稳态调速率 $\delta_{st}/\%$		瞬态调速率 $\delta_d/\%$		稳定时间 τ/s	
	非补气	补气	非补气	补气	非补气	补气
突卸 100%→0%	0.32	0.32	5.6	5.1	3.1	2.6
突加 0%→50%	0.23	0.22	4.9	3.8	3.1	2.0
突加 50%→100%	0.24	0.25	2.9	2.3	2.4	1.8

4 结论

(1) 根据柴油机调速加载过程受增压空气响应限制特点, 结合空燃比要求、各增压压力下缸内进气量、各负荷下稳态供油量和各负荷下稳态油量可增量, 分析得出补气与非补气情况下突加负载瞬态过程的燃油量随时间的限制曲线和稳态、瞬态燃油可增加量, 形成柴油机调速控制增益限制曲线。

(2) 根据迟滞系统 PID 控制规律, 结合柴油机特点, 确定了不受增压空气影响下的增益限制规律, 与增压空气压力限制曲线共同形成调速控制策略。

(3) 通过台架试验验证了控制策略准确性和可行性, 试验结果表明可满足船用发电柴油机的调速要求。试验证实, 加载过程采取补气调节的调速控制具备更好的调速效果。

参考文献:

- [1] JAVAHERIAN H, LIU D R, Kovalenko O. Automotive engine torque and air-fuel ratio control using dual heuristic dynamic programming [C]//Vancouver: 2006 International Joint Conference on Neural Networks, 2006:518-525.
- [2] JIANG J. Optimal gain scheduling controller for a diesel engine [C]//Vancouver: The Second IEEE Conference on Control Applications, 1993:42-48.
- [3] 高国权. 电站用柴油机调速系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983.
- [4] 王银燕, 于恩程. 相继增压柴油机瞬态切换喷油策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(7):839-844.
WANG Y Y, YU E C. The fuel injection strategy in the transient switching process of a sequential turbocharging diesel engine[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(7):839-844.
- [5] 王德进. 时滞系统低阶控制器设计: 参数空间法[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] 袁银南, 朱磊, 杨鲲, 等. 实现柴油机全程电子调速 PID 参数整定的仿真研究[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1):23-28.
YUAN Y N, ZHU L, YANG K, et al. Research of PID parameters regulation simulation for all-speed electronic governing of diesel[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(1):23-28.