

某大功率柴油机推进动力模块动态特性研究

堵晗育, 郭丰泽, 戎志祥, 尹立国

(七一一研究所, 上海 201108)

摘要: 以某型 16 缸大功率增压柴油机动力模块为研究对象, 采用 AMESim 软件建立了柴油机动力模块的仿真模型, 并通过试验数据对仿真模型进行了标定。基于该模型对柴油机推进动力模块加速过程中模块转速与设定值的偏差, 以及瞬态调速过程中模块带大惯量运行的规律以及喷油控制优化进行了仿真研究。研究结果表明: 减小涡轮增压器惯量可以优化柴油机加速过程的转速响应; 负荷突加、突卸瞬态过程动力模块转动惯量与转速波动值呈幂函数关系; 采用 PID 控制可以更有效地优化推进动力模块的动态特性。

关键词: 大功率柴油机; 推进动力模块; 动态特性; 转动惯量; PID 控制

中图分类号: U664.1; TK421+.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2021)01-0036-06

Research on the Dynamic Performance of a Large-Power Diesel Engine Propulsion Power Module

Du Hanyu, Guo Fengze, Rong Zhixiang, Yin Liguo

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: The power module of a 16-cylinder large-power turbocharged diesel engine was studied. A simulation model of the diesel engine power module was established using AMESim software. The model was calibrated based on the experimental data. Based on this model, the deviation between the real module speed and the set value during the acceleration process of the diesel engine propulsion power module, as well as the operation law of the module with large inertia during the transient speed control process and the optimization of fuel injection control was simulated and studied. The analysis results show that the speed response during the acceleration process of the diesel can be optimized by reducing the inertia of the turbocharger; in transient adjustment conditions of sudden load increase and decrease, the moment of inertia of the module and the value of speed fluctuation are in the relation of power function; using the PID control can effectively optimize the dynamic performance of the propulsion power module.

Key words: large-power diesel engine; propulsion power module; dynamic performance; moment of inertia; PID control

0 引言

柴油机动力模块是船舶动力系统中应用最多的动力型式, 又称船舶的“心脏”^[1]。动力模块在船舶航行过程中提供推进动力, 通过一定的转矩和转速带动螺旋桨转动; 亦可以作为发电模块为船上的

电气设备供电。

动力模块的动态特性是指, 当动力模块的负荷突变时, 其转速随时间的变化特性, 因此又称为动态承载特性^[2]。船舶在航行时不断遇到风浪冲击, 其动力系统长时间运转在变负荷工况下, 若动态特性不佳, 会引起转速波动较大、恢复时间较长。本

文的研究对象是以自主研发的某型大功率涡轮增压柴油机为主体的推进动力模块。该动力模块的柴油机采用相继增压技术, 其平均有效压力较高, 对动力模块的动态特性影响较大^[3]。因此, 研究如何提升模块的动态特性是很有必要的。

本文构建该柴油机推进动力模块的 AMESim 仿真模型, 并结合试验数据对模型进行标定。在此基础上对该动力模块动态过程进行仿真研究与优化。

1 仿真模型

该模型由柴油机 + 高弹性联轴器 + 中间支承 + 万向联轴器组成, 配有隔振装置、辅助系统以及监控配电装置。负载测量装置为水力测功器。图 1 为该柴油机动力模块示意图。

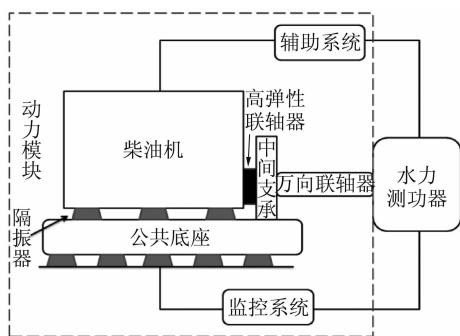


图 1 动力模块示意图

根据柴油机的相关参数, 利用 AMESim 软件平台分别对进气系统、气阀、气缸、喷油嘴、排气系统、涡轮增压器、中冷器、曲轴等部件建立仿真计算模型。由于高弹性联轴器、中间支承、万向联轴器在本模型中仅具有传递柴油机输出转矩的作用, 故在仿真模型中以试验实测的传动效率数据为依据, 将三个设备简化成一个转矩输出增益模块, 并将其转动惯量转移至柴油机曲轴模块上; 水力测功器则是通过转矩与转速的二次方曲线来模拟螺旋桨阻力随转速的实时变化。建立好的柴油机动力模块模型如图 2 所示。其中, AMESim 软件中的气体特性选择 Janaf-Yaws 模型。为了更好地模拟燃烧过程, 柴油机气缸燃烧模型选择 DFM (Dual Flame Model) 模型, 气缸传热选择 Woschni 模型^[4]。

2 模型标定

本次试验用动力模块配有水力测功器, 用来对动力模块的转速、转矩以及功率进行实时监测, 并

以监测数据为依据对仿真模型进行标定。为使该 AMESim 模型可以更全面地模拟柴油机的工作特性, 本次标定的工况点涵盖了从低负荷到高负荷的较大范围: 分别选取了柴油机在推进特性和负荷特性下 10%、25%、50%、75%、100% 共计 10 个稳态工况点, 如图 3 所示。

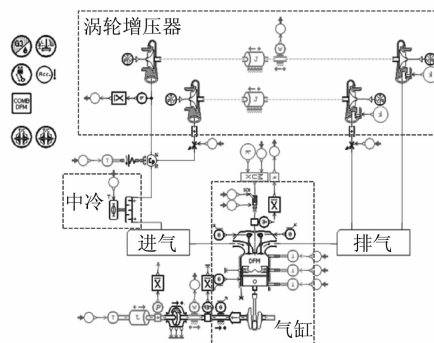


图 2 基于 AMESim 的柴油机动力模块模型

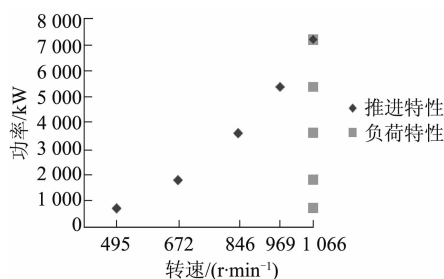


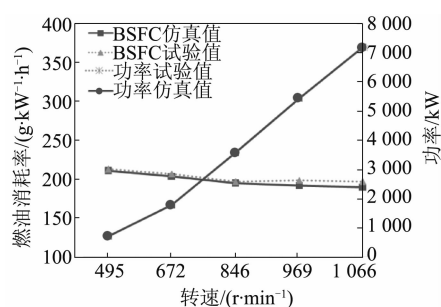
图 3 稳态标定工况点

在 AMESim 中进行模型标定, 推进工况下将调速器的转速依次设定为 495、672、846、969、1 066 r/min, 根据不同工况点分别调节 PI 系数, 使模型的计算结果最后稳定在设定转速下。负荷特性的工况标定则是先将柴油机调整至相对应的负荷, 再调节调速器的 PI 系数, 柴油机启动并提速至额定转速 (1 066 r/min), 记录相关仿真数据。标定结果见图 4, 详细数据见表 1。

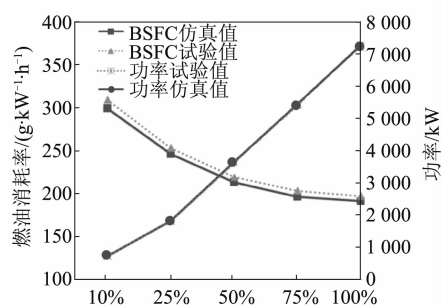
从模型标定结果可以得出: 在这 10 个标定工况点中, 模型的功率值仿真精度较高, 各工况点最大误差为 1.055% (50% 负荷特性工况), 最小误差为 0.139% (100% 推进特性工况), 平均误差为 0.67%。但燃油消耗率 (BSFC) 的仿真精度则要差一些, 尤其是在负荷特性的低负荷工况下误差较大, 各工况点最大误差为 4.531% (10% 负荷特性工况), 最小误差为 0.938% (10% 推进特性工况), 平均误差为 2.91%。综上, 标定结果各项误差均小于 5%, 处于仿真计算允许的范围, 可以通过模型进行预测模拟。

表1 模型各工况标定情况

	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	BSFC/ ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)			功率/kW		
		仿真值	试验值	误差/%	仿真值	试验值	误差/%
推进特性	495	211	213	0.938	727	720	0.972
	672	204	207	1.449	1 792	1 800	0.444
	846	195	197	1.015	3 579	3 600	0.583
	969	192	199	3.517	5 444	5 400	0.814
	1 066	190	197	3.553	7 190	7 200	0.139
负荷特性	负荷/%	BSFC/ ($\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)			功率/kW		
		仿真值	试验值	误差/%	仿真值	试验值	误差/%
	10	295	309	4.531	723	720	0.417
	25	243	253	3.952	1 811	1 800	0.611
	50	211	219	3.653	3 638	3 600	1.055
	75	196	203	3.448	5 441	5 400	0.759
	100	191	197	3.045	7 264	7 200	0.889



a) 推进特性



b) 负荷特性

图4 模型标定结果

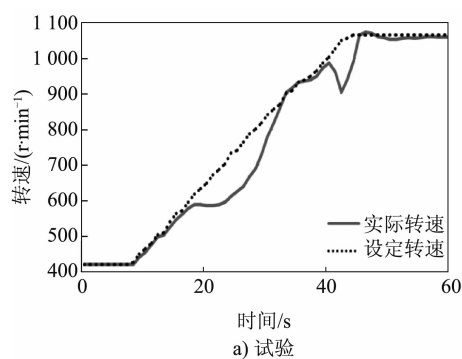
3 加速性能研究

加速过程，一般指动力模块由怠速直接加速至额定转速的过程，是船舶在日常行驶中较为常见的动态过程。研究动力模块的加速性能，对船舶的机动性和灵活性的提升至关重要。本次研究的动力模块怠速为420 r/min，额定转速为1 066 r/min，以下主要针对该转速区间进行研究。

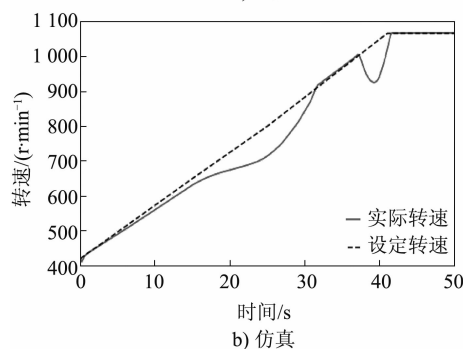
3.1 加速过程仿真模拟

加速过程的试验与仿真结果对比如图5所示。图5a) 为加速试验中模块实际转速与设定转速的对比。可以看到：从怠速加速到600 r/min 这一过

程，模块的实际转速与设定转速大体一致，基本可以达到实时匹配；但在600 r/min至900 r/min的过程中，模块的实际转速与设定转速存在较大的偏差；在900 r/min至1 000 r/min的过程中，实际转速与设定转速先是匹配的，但在尾段又跌落至900 r/min；再经过一定时间后恢复至与额定转速基本匹配。图5b) 为仿真计算中模块实际转速与设定转速的对比，与图5a) 对比可以看到：仿真模型基本可以模拟出试验中两处转速偏差现象，匹配性较好。



a) 试验



b) 仿真

图5 实际转速与设定转速的试验与仿真结果对比

3.2 功率随转速变化仿真模拟

功率随转速变化的试验与仿真结果对比如图6

所示, 可以看到两者存在较大误差。

这是由于在仿真软件中, 模型设置的负载为与转速呈二次方关系的负转矩, 转速的波动会使负载跟着实时波动, 这一过程没有延迟和滞后, 因此动力模块的功率曲线波动剧烈。而在加速试验过程中, 动力模块的负载装置为水力测功器, 虽然与仿真中设置的二次方系数相同, 但其转矩的变化不够灵敏, 且存在一定的延迟与滞后现象, 负载无法根据模块转速的变化进行实时匹配。

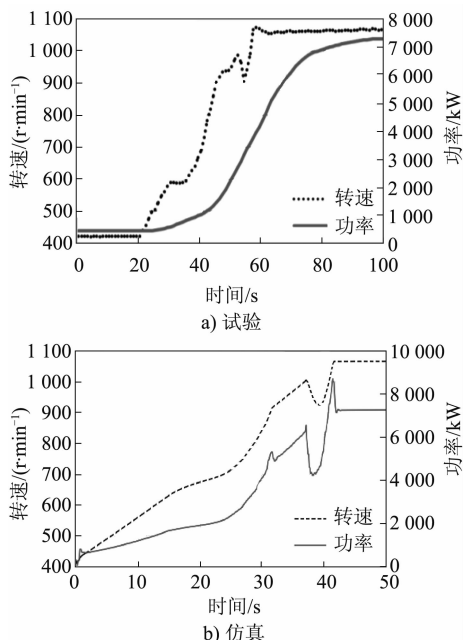


图6 功率随转速变化的试验与仿真结果对比

3.3 扭矩随转速变化仿真模拟

扭矩随转速变化的试验与仿真结果对比如图7所示。可以看出: 动力模块在加速过程中, 水力测功器的扭矩变化较为平缓, 没有明显的波动, 匹配实时性较差; 而仿真中负载扭矩则基本随转速实时变化, 跟随性较好, 故仿真中的扭矩曲线变化较为剧烈。

3.4 转速偏差仿真模拟

对比动力模块加速试验中实际转速与设定转速可以看出: 转速在 600 ~ 900 r/min (区间 1) 和 1000 r/min 附近 (区间 2) 出现了两次数据偏差。经大量仿真分析发现: 改变涡轮转子的转动惯量可以较好地模拟出区间 1 发生的设定转速与实际转速不匹配的情况。其仿真结果如图8所示。

图8a) 为不同涡轮转子转动惯量下动力模块的转速变化曲线。可以看到: 随着涡轮转子转动惯量的减小, 转速偏差明显减小; 在 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 转动惯量下, 区间 1 基本无转速偏差。故可以得出结论: 若试验中采用转动惯量更小的涡轮增压器, 则转速偏差现象可以得到优化。

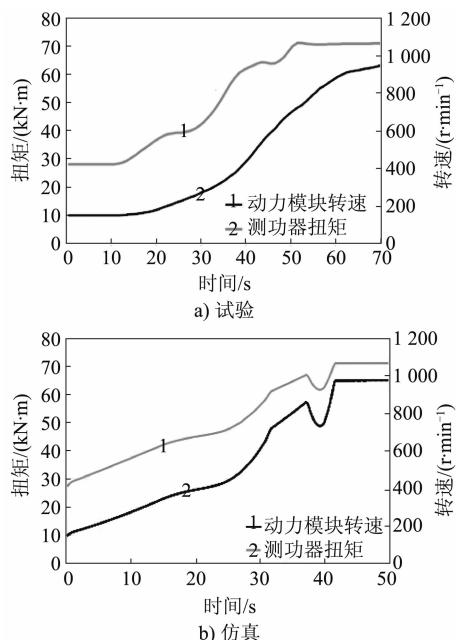


图7 扭矩随转速变化的试验与仿真结果对比

图8b) 为不同涡轮转子转动惯量下动力模块的功率变化曲线。可以看出: 在加速过程中, 动力模块发生两次功率激增现象, 均出现在模块发生转速偏差后转速升速率最高时。随着涡轮转子转动惯量的减小, 功率激增量明显减小。

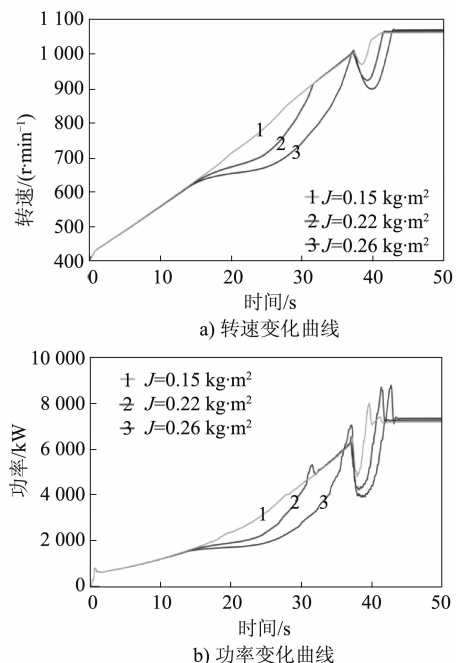


图8 不同涡轮转子转动惯量下动力模块转速及功率的变化

区间 2 发生转速突降现象是由于此模块采用相继增压的形式, 在加速工况下可控增压器约在模块转速达到 950 r/min 时开启, 可控增压器的切入致使增压压力骤降, 进而影响了动力模块的功率输出, 导致转速骤降。图9a) 为加速试验中增压压

力的变化情况;图9b)为动力模块加速试验过程中涡轮增压器转速变化。可以看出:在40 s时,可控增压器开启、转速瞬间增大,动力模块的增压压力骤降,基本增压器转速降低;待两个涡轮增压器转速相等后,一同加速至额定转速。

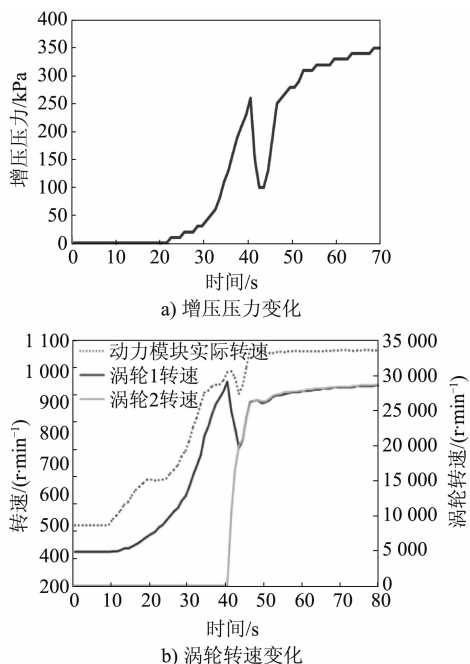


图9 试验中加速工况下相关参数变化

4 瞬态调速性能研究

船舶在实际航行中,由于受到风浪的影响,阻力会实时变化,造成动力模块的转速波动,航行的稳定性会有所影响。因此,对变负荷工况下转速波动瞬态过程、转速波动率以及恢复时间进行分析与优化。

4.1 瞬态调速过程仿真模拟

由于采用该动力模块的柴油机为相继增压型式,其平均有效压力 p_e 较大,对模块的动态特性有较大影响。参考GB/T 3475—2008标准,本次仿真采用先突卸所有负荷,待转速稳定后再进行三级突加负荷的形式。即,0~50 s柴油机从怠速加速至额定转速并保持稳定;50 s时突卸所有负荷;60 s时负荷从0%突加到28% (2 016 kW);70 s时负荷从28%突加到57% (4 104 kW);80 s时负荷从57%突加到100% (7 200 kW)。仿真结果如图10所示。从仿真结果可以看出:柴油机转速在50 s时达到最大,为1 126 r/min;在80 s时最小,为1 038 r/min。瞬态调速率最大为5.63%,符合调速等级IV的要求。

4.2 转动惯量对瞬态调速性能的影响

为了探究动力模块在不同转动惯量下的动态特

性,在仿真软件中将曲轴模块的转动惯量设置为750~2 750 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,每500 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 为一档。突加突卸过程仿真结果如图11所示。可以看到:随着转动惯量的增大,转速波动减小;当转动惯量过小时,转速出现一定范围内波动现象。根据此过程中转速波动的幅值与额定转速的偏差量,可得出:此过程转速波动量与转动惯量呈幂函数关系,具体规律如图12所示。

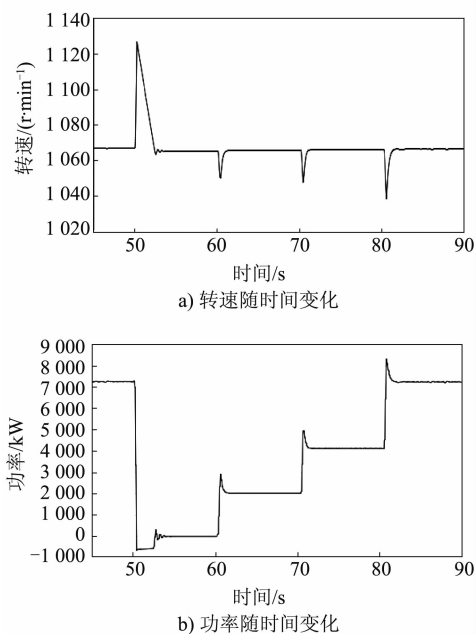


图10 瞬态调速过程仿真

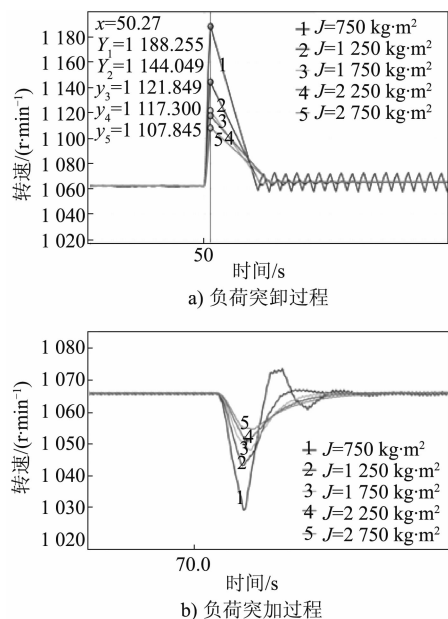


图11 不同转动惯量下转速变化规律

4.3 PI与PID控制器对瞬态调速性能的影响

推进型柴油机动力模块的运行工况复杂多变,转速覆盖范围较大,不同的喷油调节策略会对动力

模块的动态特性产生明显影响。因此,通常须根据实船的应用工况来开展针对性的控制器参数优化,以改善动力模块的动态特性。本模型中动力模块的转速是通过调节喷油器的喷油持续期来调节的,而喷油持续期的长短取决于喷油压力与 PI 控制器的输出值。不同转速有与之对应的喷油压力。前文中模型的喷油控制采用 PI 控制器,本节采用 PID 控制器进行对比试验。从图 13 可以看出:当采用 PID 控制,负载突变时的转速波动小于只使用 PI 控制;转速恢复至稳定的时间也明显缩短,转速波动率有所降低。

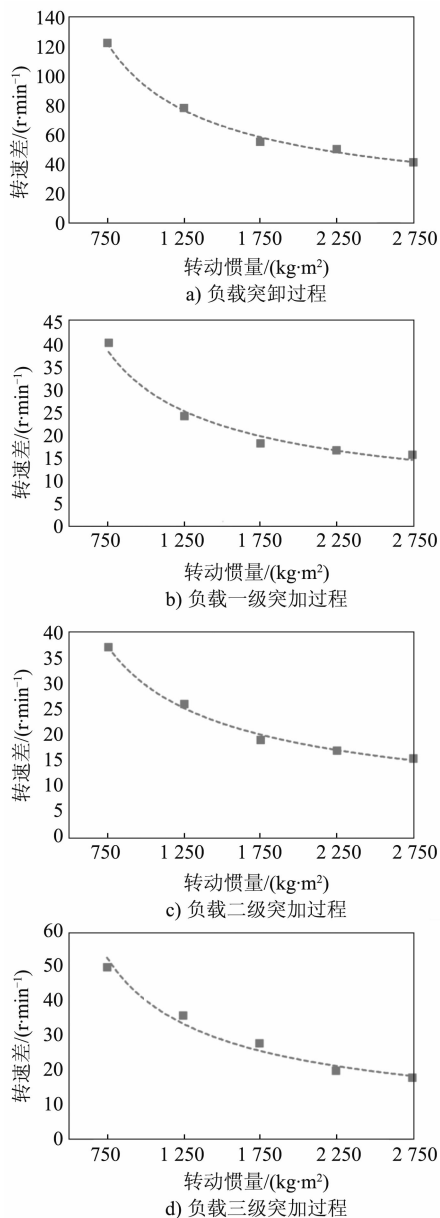


图 12 转动惯量与转速波动规律

5 总结

本文基于 AMESim 建立了某型柴油机动力模块仿真模型,对其进行了多个稳态工况点的标定,在此基础上开展了动力模块动态特性研究,得到如下结论。

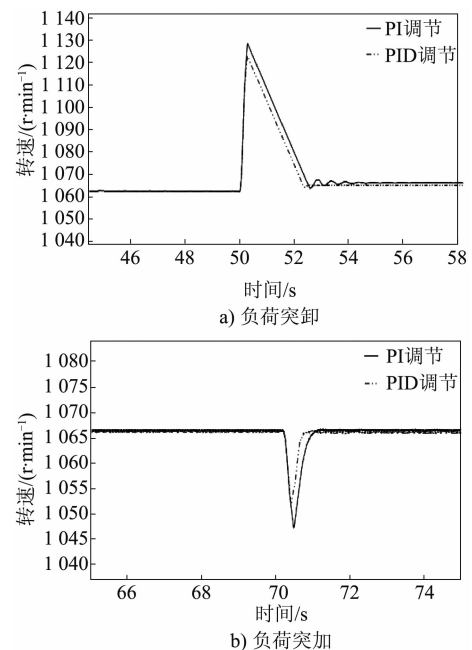


图 13 PI 与 PID 调节转速变化规律

(1) 减小涡轮增压器的转动惯量可以减小动力模块加速过程中实际转速与设定转速间的偏差。

(2) 分别设置不同的动力模块转动惯量,仿真分析得出:动力模块的转动惯量与突加、突卸过程的转速波动呈幂函数关系。

(3) 使用 PID 调节器代替 PI 调节器控制喷油持续期,可以使转速波动减小,动态特性提升。

参考文献

- [1] 王海燕. 大型低速船用柴油机建模与系统仿真 [D]. 大连: 大连海事大学, 2006.
- [2] 黄锦川, 黄锦星. 船用增压柴油机动态特性的评估方法分析 [J]. 柴油机, 2008, 30 (4): 19-23.
- [3] 元骥才. 涡轮增压柴油机瞬态特性影响规律研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [4] WOSCHNI G, FIEGER J. Determination of local heat transfer coefficients at the piston of a high speed diesel engine by evaluation of measured temperature distribution [C] // SAE International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition. Warrendale: SAE, 1979.