

大功率天然气发动机突加载工况瞬态性能研究与改进设计

范光鑫¹, 邓康耀¹, 牟善祥², 祝传良²

(1. 上海交通大学 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: 针对 12V190 型天然气发动机定转速突加载响应性能较差, 不能满足油田工作要求的问题, 利用 GT-Power 软件建立了一维仿真模型, 研究了增压器转动惯量、进排气管容积、增压系统型式、发动机负载转动惯量对该天然气发动机突加载响应性能的影响。根据研究结果对该发动机增压系统进行了改进设计, 同时提高了发动机负载转动惯量, 使其瞬态响应性能有所提高, 满足油田钻井作业的要求。

关键词: 天然气发动机; 瞬态响应; 脉冲增压; 转动惯量

中图分类号: TK421+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)03-0006-05

Research on Transient Performance and Improved Design of High Power Natural Gas Engine under Sudden Loading Working Condition

Fan Guangxin¹, Deng Kangyao¹, Mou Shanxiang², Zhu Chuanliang²

(1. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Key Laboratory for Power Machinery & Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240; 2. Shengli Oilfield Shengli Power Machinery Group Company Ltd., Shandong Dongying 257000)

Abstract: The poor transient response performance of 12V190 natural gas engine made it unable to meet the requirements of the oil-drilling work. The simulation model of 12V190 natural gas engine was built using GT-Power and factors which influence the transient response performance such as the rotary inertia of turbocharger, the volume of intake and exhaust pipe, the type of turbocharging system, and the rotary inertia of engine shaft were studied. The turbocharging system was improved and the rotary inertia of engine shaft was increased in accordance with the results of the research. The transient response performance of 12V190 natural gas engine was improved which made it able to meet the requirements of the oil-drilling work.

Key words: natural gas engine; transient response; pulse turbocharging; rotary inertia

0 引言

随着化石燃料的日趋减少, 以及排放法规的日益严格, 天然气发动机技术得到了快速发展, 并且在欧美国家得到了相当程度的普及。与同排量的柴

油机相比, 天然气发动机的动力性能相同或稍差, 但是在排放和经济性方面的优势十分明显。

在油田钻井作业中, 燃料成本占到钻井成本的 30% 以上^[1]。当前, 油田钻井作业主要使用柴油机作为工作机型, 柴油成本较高; 因此, 油田内部

支持以气代油，以降低成本，实现节能减排^[2]。

与柴油机相比，预混式天然气发动机在定转速突加载工况下响应时间长，抗负荷冲击能力差，转速波动率大，转速恢复时间过长，难以满足钻井作业要求。济南柴油机股份有限公司采用了两台 2000 型天然气发动机与一台柴油机并联的方式，实现了多口钻井的钻探，但是发动机突加大负荷工况下最大转速波动率约 15%，与同功率柴油机相比仍有差距^[3]。西部钻探克拉玛依钻井公司使用一台 810 kW 柴油机和两台 1 000 kW 天然气发动机的 ZJ32J 钻机现场变载对比试验表明：突加载工况下天然气发动机在低速加载时的响应时间较柴油机的响应时间迟滞 20% ~ 30%，变载工况下天然气发动机的恢复时间比柴油机的慢 5 s 左右^[4]。

若直接将天然气发动机用于钻井作业，由于天然气发动机在突加载工况下的响应能力较弱，遇到负载突增的情况可能造成发动机停机等严重后果，导致钻井失败。为使 12V190 型天然气发动机的突加载性能接近同功率柴油机的突加载性能，满足油田钻井工作要求，须对其进行一定的改进，以提升该发动机在定转速突加载工况下的响应性能。

在难以对天然气发动机进行补气、补燃的情况下，提高天然气发动机定转速加载性能的方法主要有：减小增压器转动惯量，减小进排气管直径，增大发动机转动惯量等。本文将联合使用几种方法以达到在特定瞬态加载工况（转速 1 300（r · min⁻¹），加载 500 kW）下，实现最大转速波动率 ≤10%，恢复时间 ≤6 s 的设计要求。

转速波动率定义为 $\frac{n_i - n_{\min}}{n_i} \times 100\%$ ，式中： n_i 为发动机初始转速， $n_{\min}$ 为瞬态加载过程发动机最低转速；恢复时间定义为 $t_{\text{sta}} - t_{\min}$ ，式中： t_{sta} 为发动机转速恢复到初始转速的时刻， $t_{\min}$ 为发动机最低转速对应的时刻。

1 影响天然气发动机瞬态突加载特性的因素分析

在定转速工作状态下的天然气发动机突加负载时，发动机转速会快速下降，控制器测得转速下降后会加大节气门开度，增加进气量以提升功率。进气量增加后，排气量和排气能量也随之增加，从而提高了涡轮增压器的转速和功率，进一步提升了进气压力和进气量。

在瞬态突加负荷工况下，增压柴油机可以直接加大喷油量以快速提升功率和排气压力，从而提高

涡轮功率，增加进气量。而预混式增压天然气发动机由于难以直接提升燃料喷射量，导致排气能量增加速度慢，需要多个循环才能在排气管中建立较高的排气压力，这使得涡轮增压器涡轮端功率无法快速提升；此外增压器转子具有一定的转动惯量，瞬态工况下转子加速也需要消耗一定的排气能量。以上这些因素的叠加导致压气机端进气量增加速度慢，需要较长的时间才能在排气管中建立足够的进气压力。

瞬态突加载工况下，发动机转速变化率为：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{60}{2\pi(J_E + J_L)}(M_E - M_L) \tag{1}$$

式中： J_E 为发动机的转动惯量， J_L 为负载的转动惯量， M_E 为输出扭矩， M_L 为负载力矩^[4]。在 $(M_E - M_L)$ 一定的条件下，可以通过增加 J_E 来减小转速变化率，提高响应性能。

瞬态突加载工况下，增压器转速变化率决定了进气压力建立的速度。根据动力学原理，涡轮增压器转速变化率为^[4]：

$$\frac{dn}{dt} = \frac{60}{2\pi J_{\text{TK}}}(M_T - M_K) \tag{2}$$

在瞬态突加载工况下，为了提高增加器转速变化率，需要减小增压器的转动惯量。

上海交通大学亓骥才^[5]通过建立传递函数模型，分析了发动机结构参数对瞬态响应的影响。涡轮增压发动机结构参数对瞬态响应的影响大小排序为 $J_{\text{TK}} > V_{\text{ex}} > V_{\text{in}}$ ，其中： J_{TK} 为涡轮增压器转动惯量， V_{in} 为进气系统容积， V_{ex} 为排气系统容积。

为了提高 12V190 发动机在定转速突加载时的响应性能，本文将从提高增压系统瞬态加载响应速度和加大发动机曲轴旋转系转动惯量两种途径进行解决。

2 提高天然气发动机瞬态突加载特性的改进方案

2.1 原机建模与标定

12V190 型天然气发动机原机结构如图 1 所示，其主要的性能结构参数见表 1。

利用 GT-POWER 软件对原机建模，燃烧模型采用 SI-Wiebe 模型，并对 1 300（r · min⁻¹）下 25%、50%、75%、100% 负荷工况进行仿真计算。为验证仿真结果的准确性，将仿真计算结果与试验结果进行对比，结果如图 2 所示。

由图 2 可见，仿真模型精确度较高，最大误差在 5% 以内，表明仿真模型可以较好地反映

12V190 发动机的稳态性能，可以用于后续改进方案的计算。

表 1 12V190 天然气发动机原机主要性能和结构参数

型式	V 型 12 缸 4 冲程
增压系统	涡轮增压中冷
缸径/mm	190
冲程/mm	210
总排量/L	71.45
标定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 300
标定功率/kW	800
点火方式	火花塞点火
点火顺序	1-8-5-10-3-7-6-11-2-9-4-12

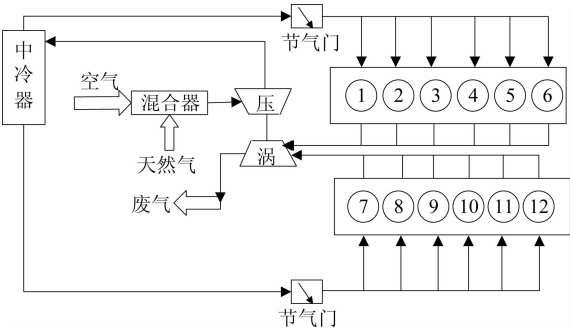


图 1 12V190 原机结构示意图

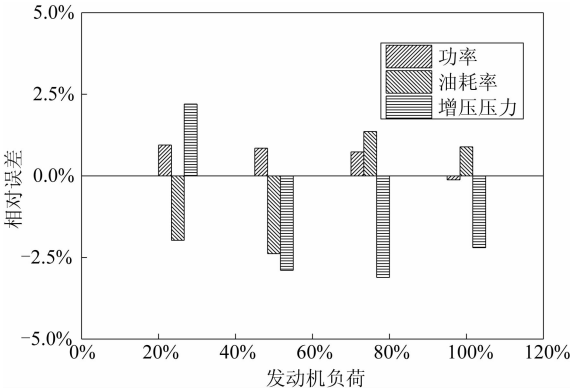


图 2 仿真模型与试验数据校核结果

2.2 突加载工况改进响应特性方案计算

原 12V190 发动机原机采用的是转动惯量较大的单增压器，在变加载工况下响应速度慢，按图 4 的加载曲线进行 500 kW 加载时，转速约下降 19%，且在 10 s 内仍然无法恢复。因此考虑采用减小增压器转动惯量的方法来加快瞬态响应。

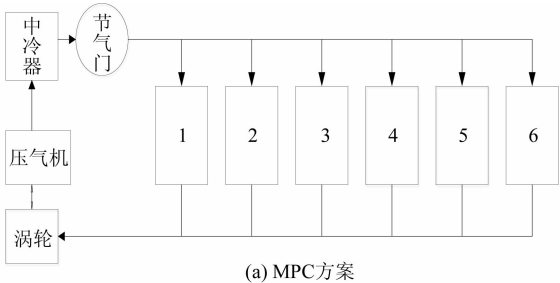
在不改变增压器转子材料的条件下，只能通过选用较小的增压器的方式来降低增压器转动惯量。但单独使用较小的增压器无法满足原机的流量要求，若仍采用原有的单增压器布置形式，可能造成压气机端和涡轮端的阻塞。为此，本文采用了双增压器方案以提高系统的定转速加载响应性能。共建立了两种双增压器方案，方案 1 采用 MPC 排气系

统，使用单入口涡轮增压器；方案 2 采用脉冲增压排气系统，使用双入口涡轮增压器。由于发动机空间布置有限，脉冲增压方案中增压器分别位于 3、4 缸之间和 9、10 缸之间。

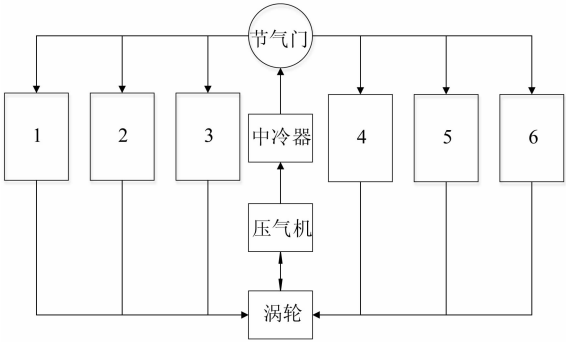
在满足原机功率恢复的条件下，重新匹配涡轮增压器，每个增压器只向 6 个气缸供气，因此增压器的尺寸较小，转动惯量较低。

原机排气系统采用的是 MPC 增压系统，MPC 增压系统结合了定压增压与脉冲增压系统的优点，增压器运行在接近定压的状态下。但是 MPC 系统的废气能量利用率不如脉冲增压系统的高^[6]，加速性能略差。与 MPC 增压系统相比，脉冲增压系统有较小的排气管容积，提高了瞬态响应性能。在负荷突然改变时，排气温度和压力的变化可以更快地传递至涡轮，从而可更快地建立进气压力，具有更高的响应速度。

脉冲增压需要尽可能减少各缸排气压力波的相互干扰，为此需要隔开相邻发火的气缸。原机发火顺序为 1-8-5-10-3-7-6-11-2-9-4-12，为了减少各缸排气压力波的互相干扰，选择 1、2、3 缸，4、5、6 缸各接入一个支排气总管，这两个支排气总管连接到一个双入口增压器；7、8、9 缸，10、11、12 缸各接入一个支排气总管，这两个支排气总管连接到另一个双入口增压器。两种方案进排气系统具体布置示意如图 3 所示（均只展示了 V 型布置中的一列）。



(a) MPC 方案



(b) 脉冲增压方案

图 3 双增压器方案结构示意图

2.2.1 突加载工况性能计算

对新方案模型的瞬态响应性能进行了仿真计算。加载曲线如图4所示,0~10 s负载功率保持100 kW,10 s时开始加载,在12 s时完成加载,此时负载功率为600 kW,之后一直保持该负载功率至20 s。PID控制器以发动机转速为输入量,以节气门开度为输出量,控制目标为发动机转速稳定在1 300 (r·min⁻¹)。仿真结果如图5、6所示。

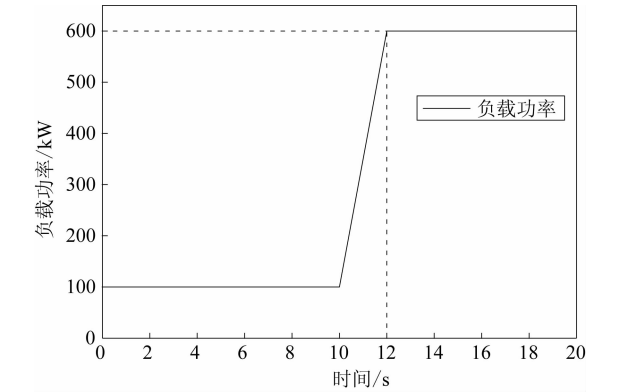


图4 负荷加载曲线

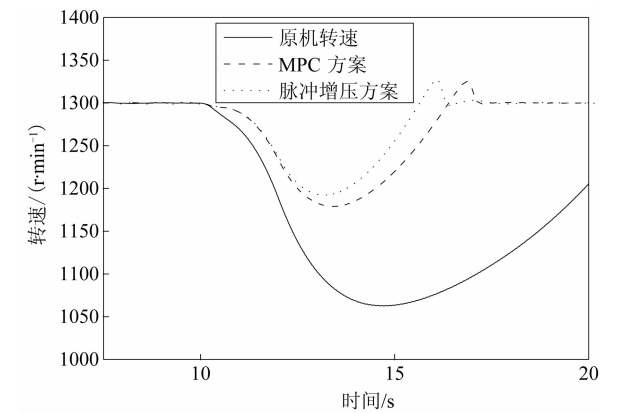


图5 原机与双增压器方案发动机转速对比

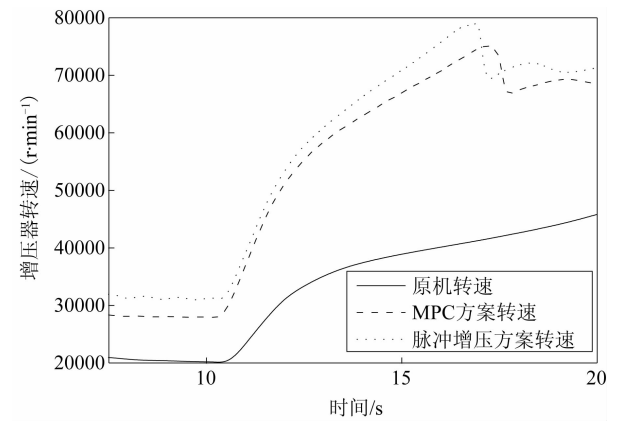


图6 原机与双增压器方案增压器转速对比

由图5、图6可见,12V190原机在突加载时,由于增压器转动惯量较大,转速提升慢,导致进气压力建立时间较长,转速下降较多,转速恢复缓

慢。采用双增压器方案后,增压器转动惯量较小,转速提高速度快,因此可以较快地提高进气压力以提高功率,恢复发动机转速。MPC方案最大转速波动率为10.15%,加载到转速恢复时间为7.72 s;脉冲增压方案最大转速波动率为9.85%,加载到转速恢复时间为7.02 s。

与MPC方案相比,脉冲增压方案对排气能量的利用更好。二者在稳态下性能相近,而在瞬态突加载工况下脉冲增压方案的响应性能更好,转速波动小,恢复时间短。

2.2.2 进排气管容积对突加载性能的影响

为了进一步提高12V190天然气发动机的突加载响应性能,提高该发动机的抗负荷冲击裕度,有必要对该发动机的进排气系统做进一步的优化。

在难以改变进气管长度的条件下,可以通过改变进气管管径的方式改变进气管道的容积。

原机由于考虑采用瓦斯气作为燃料的情况,将节气门后的进气管直径设计为190 mm。过大的管径导致进气压力建立缓慢,不利于瞬态加载时快速提高进气量。因此在保持节气门不变的前提下缩小节气门后进气管直径,对多个进气管直径分别进行仿真计算,结果如图7所示。

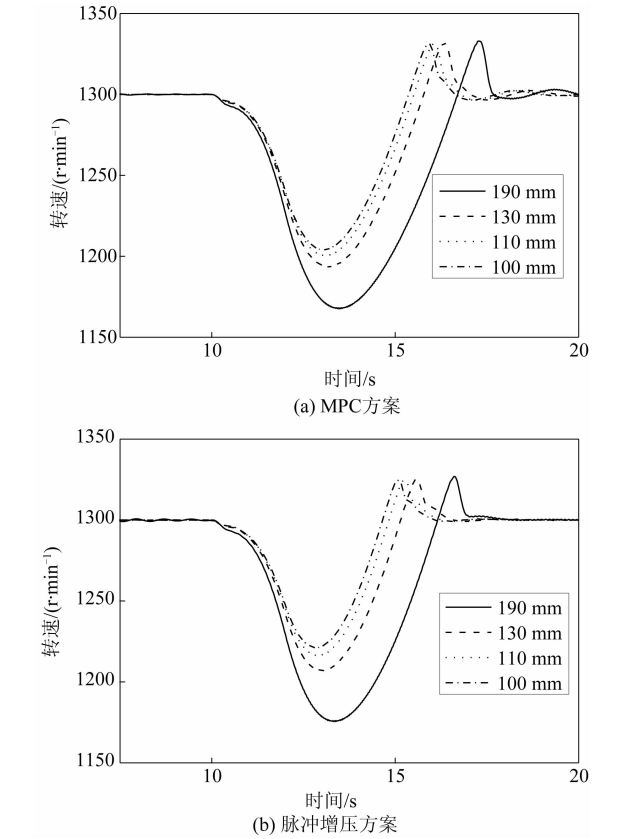


图7 进气管直径对瞬态响应的影响

由图7可以看出,随着进气管道直径减小,转

速波动率降低,瞬态加载响应时间缩短。但是进气管直径缩小后会导致进气流速上升,进气管流动摩擦增大,稳态耗气率上升(见图 8)。稳态工况下,MPC 方案与脉冲增压方案相比:涡轮增压器运行在相对匀速的状态下,没有频繁的加减速过程,因此耗气率更低。综合考虑进气管直径对恢复时间和耗气率的影响,选择进气管直径为 110 mm。

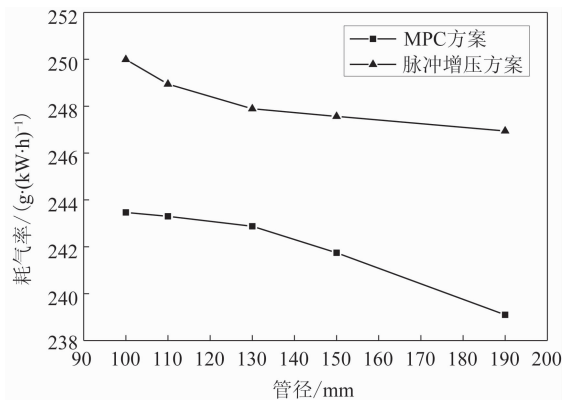


图 8 进气管直径与耗气率的关系

对脉冲增压方案须进一步研究考察排气支管直径与突加载响应的关系。改变排气支管直径,重新进行仿真计算,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,随着排气支管直径减小,发动机转速波动减少,转速恢复时间加快。但是随着支管直径减小,排气流速加快,排气管内摩擦损失增加,导致发动机耗气率提高(见图 10)。综合考虑恢复时间和耗气率的影响,脉冲增压方案的排气支管直径选用 90 mm。

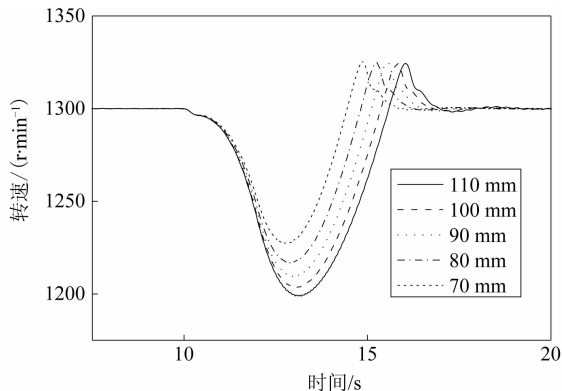


图 9 排气支管直径与瞬态响应的关系

2.2.3 转动惯量对突加载性能的影响

为了进一步提升发动机定转速加载的响应性能,须增加发动机飞轮质量以增大发动机自身的转动惯量,提高发动机的抗负荷冲击性能,减小发动机转速波动。以脉冲增压方案为例,改变发动机转动惯量进行仿真计算,计算结果如图 11 所示。

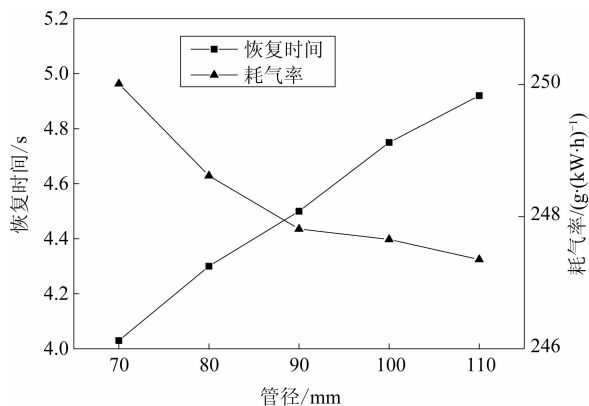


图 10 排气管直径与排气管流速、耗气的关系

由图可知,随着发动机自身转动惯量加大,恢复时间稍有增加,但是最大转速差有所减小,发动机抗负荷冲击性能有所加强。初始方案转动惯量为 $120 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 对应的最低转速为 $1209 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$,转速恢复时间为 4.41 s ;转动惯量增加至 $160 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 时,对应的最低转速为 $1225 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$,转速恢复时间为 4.63 s 。

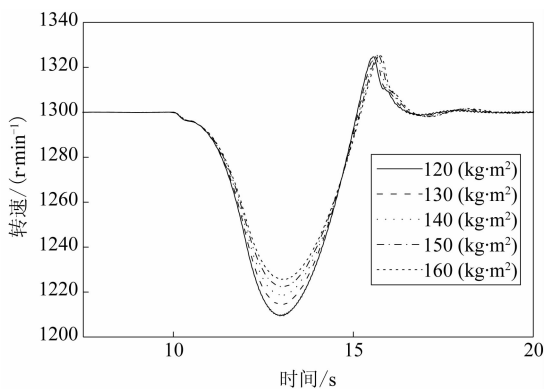


图 11 系统转动惯量与瞬态响应的关系

加大飞轮转动惯量可以起到抗负荷冲击的作用,有利于提高定转速突加载时的响应性能,减小转速波动。但是较大的飞轮转动惯量也会导致发动机起动时须克服较大阻力,导致起动时间延长,发动机加速性能变差。

综合考虑增加发动机转动惯量对突加载性能和发动机起动性能的影响,将发动机转动惯量提高至 $150 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$,为此需要在发动机飞轮上增加 $30 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 的转动惯量。利用圆盘转动惯量计算公式(3)可以求出对应的飞轮尺寸:

$$J = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2}\rho\pi R^4L \quad (3)$$

原机飞轮直径为 0.84 m ,由式(3)可以计算得出:飞轮须增加的厚度 $L = 0.08 \text{ m}$ 。改造后最大转速波动率为 6% ;恢复时间为 4.63 s 。

(下转第 32 页)

能也不稳定,不利于电能反馈系统的应用。

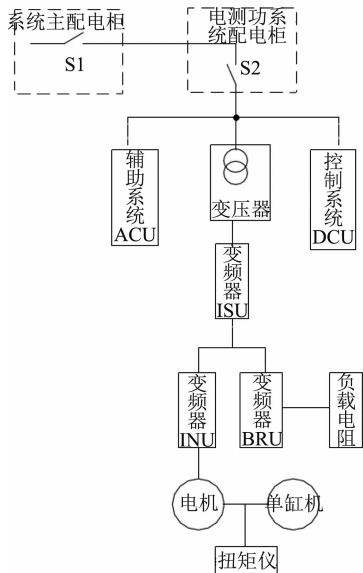


图 2 电力测功系统拓扑图



图 3 电测功系统变频器

4 结束语

本文为船用大功率单缸柴油机试验选配的电力测功系统,同时达到了单缸柴油机起动和能源消耗及测功的要求。验证了在大功率柴油机试验时选用电力测功系统的可行性,保证了单缸柴油机试验的顺利进行。在大功率柴油机以空气起动及水力测功作为选配方案的常规模式下,新增了一种可供选择的选配方案,为后续船用柴油机试验系统设计提供了新的方向。同时,所选配的电力测功系统具有电能回馈功能,可以将柴油机运行过程中输出的能源予以利用,提高了能源利用率。

电测功系统以其智能变频器系统实现了电机电动态与发电态的快速切换,作为一种新型的船用柴油机试验设备有很大的发展空间及研究价值。针对电能反馈验证中出现的问题,如果能够在现有方案基础上进行扩展,配置一套智能电能源管理系统,并将电能反馈的方案用于船用大功率柴油机的生产试验中,将为能源合理化利用提供新的前景。

参考文献

- [1] 于胜,王映红.电机拖动与变频调速[M].北京:教育科学出版社,2015.
- [2] 李自光,周中方,张相胜.变频器应用维护与修理[M].北京:地震出版社,2005.

3 结 论

(1) 仿真计算表明:减小增压器转动惯量,增加发动机转动惯量,减小进排气系统管径以及采用脉冲增压系统可以提高天然气发动机的定转速突加载响应性能;

(2) 减小进排气管容积可以加快提高天然气发动机的响应性能,但是会导致耗气率升高;

(3) 针对 12V190 型发动机,提出了改进方案,提高了该发动机的定转速突加载响应性能,最大转速波动率为 6%,恢复时间为 4.63 s,使其可以顺利用于油田钻井作业。

参考文献

- [1] 韩祥鹏,张宏博,颜慧,等.钻井用柴油/天然气双

燃料发动机的研究[J].内燃机与动力装置,2011(1):17-20.

- [2] 牟德强,孙佳俊.12V190 天然气机钻井动力性研究[J].内燃机与动力装置,2011(3):16-19.

- [3] 李明.天然气机驱动机械钻机技术研究与应用[D].荆州:长江大学,2013.

- [4] 方永春,曾志伟,许山明,等.柴油与天然气发动机动力性能对比分析[J].石油和化工设备,2015(9):43-46.

- [5] 元骥才,崔毅,石磊,等.利用传递函数模型分析涡轮增压柴油机结构参数对瞬态特性的影响[J].内燃机与动力装置,2012(6):9-12.

- [6] 钱树基.谈脉冲增压和 MPC 增压[J].内燃机,1995(5):41-42.

- [7] 张有,顾宏中.车用发动机增压系统的选型及计算分析[J].车用发动机,2001(6):24-28.