

上海市船舶与海洋工程学会 2020 年学术年会轮机专场论文专栏

大功率气体发动机负荷控制方式研究

焦联国^{1,2}, 李焕英^{1,2}, 郑文胜¹, 李策略¹, 张旭东^{1,2}, 李锦华^{1,2}, 刘选科^{1,2}

(1. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108; 2. 陕西柴油机重工有限公司, 陕西 兴平 713105)

摘要: 针对气体发动机不同进气方式的特点, 结合不同应用领域的负荷特性, 对气体发动机负荷控制方式, 包括节气门控制、进气旁通阀控制和废气旁通阀控制等进行研究。对比分析表明: 预混合进气多用于气体发电领域, 比较适合采用节气门 + 进气旁通控制的方式; 进气道多点喷射多用于船舶推进领域, 比较适合采用节气门 + 废气旁通控制的方式。

关键词: 气体发动机; 进气方式; 负荷控制

中图分类号: TK433.4⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2021)03-0020-03

Research on the Load Controlling Method of Large Power Gas Engines

Jiao Lianguo^{1,2}, Li Huanying^{1,2}, Zheng Wensheng¹, Li Celyue¹, Zhang Xudong^{1,2},
Li Jinhua^{1,2}, Liu Xuanke^{1,2}(1. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108;
2. Shaanxi Diesel Heavy Industry Co., Ltd., Shaanxi Xingping 713105)

Abstract: Aiming at the characteristics of varied intake ways of gas engines, combined with the load characteristics in different applications, the load controlling methods of gas engines were studied, including throttle control, intake bypass control and wastegate control. The comparison analysis show that premix intake is more applied in gas generating, and throttle + intake bypass control is a suitable way; intake manifold multi-point injection is more applied in marine propulsion, and throttle + wastegate control is more suitable.

Key words: gas engine; intake method; load control

0 引言

绿色气体燃料是优质的清洁能源, 已在世界范围内得到广泛的开发和利用。近年来, 为了满足日益严苛的排放法规, 越来越多的发动机制造商推出了气体发动机。我国在大功率气体发动机技术开发上与国外先进国家相比仍存在较大差距。本文主要针对气体发动机不同进气方式, 结合不同应用领域的负荷特性, 对大功率气体发动机的负荷控制方式展开研究。

1 气体发动机进气方式

气体发动机进气方式包括预混合进气、进气道喷射(单点喷射和多点喷射)和缸内直喷三种。目前技术上比较成熟的为预混合进气和进气道喷射。

1.1 预混合进气

预混合进气方式是通过布置在增压器(压气机)前的混合器将空气和燃气按照一定的空燃比进行混合, 再经过增压、冷却, 最后进入气缸。该种方式发动机的动态响应性较差, 但混合气的均匀性好, 发动机能够获得较好的稳态性能, 更适用于对气源品质、动态响应要求不高的气体发电领域。

1.2 进气道喷射

(1) 单点喷射。单点喷射方式是通过节气门控制增压空气流量,在节气门后设置燃气喷射阀进行燃气集中喷射,进而与增压空气混合,再进入气缸。该方式缩短了混合气路径,混合气的均匀性和各缸均匀性较好,同时在动态响应上相对于预混合进气有所提高。

(2) 多点喷射。多点喷射是每缸设置独立的燃气喷射阀,各缸进气道喷入的燃气与增压空气混合后直接进入气缸。其动态响应性比预混合进气和单点喷射都好,但是由于各缸进气量和燃气喷射阀的差异,各缸之间均匀性较差,且混合气进气道短,混合气均匀性差。

多点喷射和单点喷射一样,都是实现燃气与增压空气混合,燃气压力须根据发动机负荷和增压空气压力进行调节,对气源品质要求较高,控制逻辑也更为复杂。由于其瞬态响应性更好,多用于船舶推进领域和动态响应要求较高的气体发电领域。

2 气体发动机负荷控制方式

气体发动机负荷控制方式有节气门控制、进气旁通阀控制和废气旁通阀控制等,不同的控制方式对发动机的性能和响应性有不同的影响。

2.1 节气门控制

节气门控制是在空冷器后设置节气门,根据发动机转速/负荷来调节进气量。节气门属于节流设备,单纯采用节气门控制时,要求增大压气机压比以保证足够的节气门压差,因此会导致发动机换气功损失较大,发动机热效率降低,而且对于环境温度变化的适应性较差^[1]。

2.2 进气旁通控制

进气旁通控制是在空冷器后和压气机进口间增加一支旁通管路,通过管路中的调节阀(进气旁通阀)控制旁通至压气机的增压气体流量,从而实现气体发动机负荷控制。由于旁通了一部分增压气体到压气机前,可以看作是储存了一部分能量,有助于加载时发动机的响应。

2.3 废气旁通控制

废气旁通控制是在涡轮进口和涡轮出口间增加一支旁通管路,通过管路中的调节阀(废气旁通阀)控制通过废气涡轮的废气流量,从而实现气体发动机负荷控制。废气旁通阀属于高温设备,与进气旁通阀相比,价格高、可靠性低、维护性差。

气体发动机负荷控制方式示意图如图1所示。由于节气门的节流效应会降低气体发动机的效率,尤其是

在高速、高负荷工况时更为明显,因此一般不单纯采用节气门控制,通常会采用节气门+进气旁通,或节气门+废气旁通的方式实现气体发动机负荷控制。在低负荷工况下由节气门控制,中高负荷工况时节气门全开,通过进气旁通阀或废气旁通阀进行负荷控制^[1]。

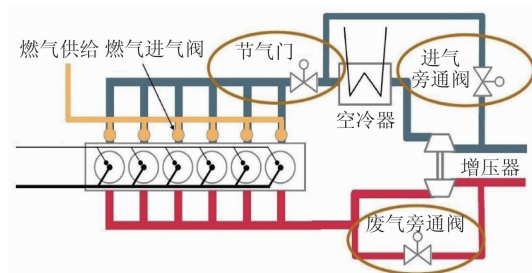


图1 气体发动机负荷控制方式示意图

3 负荷控制方式匹配

3.1 负荷特性分析

气体发动机一般用于船舶推进或气体发电领域,二种应用负荷特性分别对应推进特性和发电特性。推进特性时,发动机负荷随转速的变化而变化:负荷降低转速随着降低,要保证一定的过量空气系数就须减小旁通阀开度;而负荷升高时则须增大旁通阀开度。发电特性时,转速不随负荷的变化而变化:低负荷时要增大旁通阀开度,以确保适当的空燃比;负荷升高时则减小旁通阀开度^[2]。不同负荷特性下旁通阀的开度见图2。

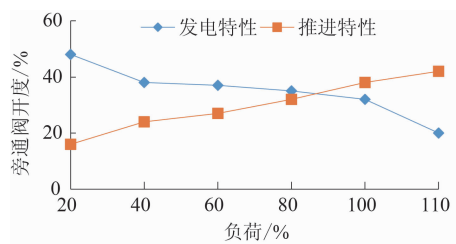


图2 不同负荷特性下旁通阀开度示意图

3.2 旁通控制对发动机效率的影响

内燃发动机的换气压差是指进气压力 P_k 和排气压力 P_T 之差,即 $(P_k - P_T)$ 。在采用增压器增压后,由于 P_k 增加, P_k/P_T 可能大于1,相对排气背压减小,发动机换气更顺畅,出现换气正功,有利于提高发动机的扭矩和改善发动机经济性^[3]。

采用进气旁通时,由于旁通掉一部分增压气体到压气机进口,进气压力降低,换气压差 $(P_k - P_T)$ 进一步降低,甚至变为负值;相对排气背压增大,造成发动机换气不畅,可能出现换气负功,影响发动机的动力性和经济性。

采用废气旁通时, 由于旁通掉一部分废气直接到涡轮出口, 降低了发动机排气背压, 使发动机换气气压差增大, 换气更加顺畅, 发动机的动力性和经济性得到改善^[4]。

3.3 负荷特性匹配分析

发电特性时不同负荷控制方式对发动机效率影响的仿真曲线如图 3 所示。在 50% 负荷以下时, 采用废气旁通时, 发动机效率高于采用进气旁通方式。这是因为此阶段废气旁通阀开度较大, 发动机换气气压差大、换气功损失小, 可能出现换气正功。大约在 70% 负荷以上时, 采用进气旁通或废气旁通, 发动机效率基本一致。这是因为在高负荷阶段, 进气旁通阀或废气旁通阀的开度很小, 几乎为关闭状态, 对发动机换气影响微弱。而采用节气门控制时, 由于节气门的节流效应, 发动机的效率均低于采用废气旁通和进气旁通时的效率。

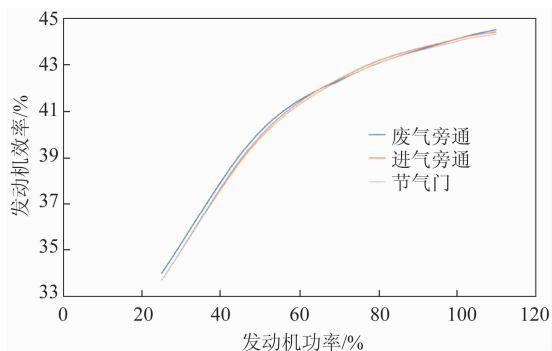


图 3 发电特性时不同控制方式下发动机效率曲线

推进特性时, 旁通阀开度随着发动机负荷的增加而逐渐增大。采用进气旁通时, 由于旁通掉更多的增压气体, 换气气压差进一步减小, 换气功损失增大; 而采用废气旁通时, 由于旁通掉更多的废气, 排气背压减小, 换气功损失减小, 有利于提高发动机动力性和经济性。

由此可见, 在发电特性下, 更适合选用进气旁通方式; 而在推进特性下, 更适合选用废气旁通方式。

多点喷射气体发动机多应用于船舶推进和对发动机动态响应要求较高的领域。在发动机瞬态加载时, 燃气喷射系统能够通过控制系统对检测到的外界干扰信号快速做出反应。而涡轮增压系统须在排气能量提升后, 提高涡轮增压器的功率, 从而提高压气机转速, 进而增加系统进气量。因此, 在瞬变过程中进气的响应速度要远远慢于燃气喷射响应速度, 即“进气迟滞”现象。为改善气体发动机涡轮增压器进气响应速度, 有效提升发动机动态响应速度, 一般都采用小惯量、轻质、高效涡轮^[5]。而在中高负荷工况时, 由于爆震和失火等因素的限

制, 必须要控制进气压力; 同时又必须保证一定的涡轮功率, 以便在瞬变工况时能够快速提高压气机转速。此种情况下采用废气旁通控制或变截面涡轮增压器是不错的选择, 由于后者成本高, 控制相对复杂, 因此废气旁通控制被广泛应用。

3.4 增压器匹配分析

不同的负荷控制方式对增压器的选配有较大的影响。若采用单纯的节气门控制, 压气机的压比须提高以确保足够的节气门压差, 如此将导致体积流量减小, 因此须采用较小的压气机叶轮。如果采用进气旁通控制, 一部分混合气会重新回到压气机前, 压气机流量变大, 某些情况下甚至需要大一号的增压器。采用废气旁通控制的体积流量介于上述两者之间^[2]。因此, 在选用负荷控制方式时, 可参考增压器选型与之相匹配。比如, 当压气机流量受限时, 可考虑采用废气旁通方式实现发动机效率和功率的提升。

4 结论

基于以上分析, 由于废气旁通阀价格远高于进气旁通阀, 而且废气旁通阀工作在高温环境下, 可靠性和维护性较差, 因此一般情况下, 发电特性下选择节气门+进气旁通控制, 推进特性下选择节气门+废气旁通控制。结合气体发动机不同进气方式的特点和应用领域, 预混合进气多用于气体发电领域, 比较适合采用节气门+进气旁通控制的方式; 进气道多点喷射多用于船舶推进领域, 比较适合采用节气门+废气旁通控制的方式。总之, 负荷控制方式的选择, 须基于发动机负荷特性及应用要求, 同时综合考虑进气方式的特点, 以及增压器选型和成本等因素。

参考文献

- [1] 叶飞帆, 郭静川, 顾宏中. 带放气阀的增压系统性能研究 [J]. 宁波大学学报 (理工版), 1991 (1): 105-111.
- [2] 胡伯宗, 戴欣怡. 四冲程气体和双燃料发动机涡轮增压系统应用 [C]. 2018 年世界内燃机大会学术交流论文集, 2018.
- [3] 张华葆, 周军, 姜立志. 进气旁通对涡轮增压柴油机性能影响的试验研究 [J]. 车用发动机, 1989 (6): 27-33.
- [4] 马少康, 梁涛, 苏艳君, 等. 排气背压对发动机性能影响的研究 [J]. 小型内燃机与车辆技术, 2015, 44 (2): 12-15.
- [5] 孔庆阳, 钱爱华. 气体燃料发动机增压技术 [J]. 内燃机与动力装置, 2013, 30 (3): 48-51.