

混合动力工程机械与氢动力发动机的研究进展*

董宁宁, 殷晨波*, 张子立, 朱 斌
(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:混合动力工程机械和氢动力发动机是开发利用新能源的典型代表。概述了二者的研究现状、在工程和汽车领域里的应用及其关键技术。为进一步降低排耗,分别针对工程机械的能量回收率、燃料利用率低和氢气的储运以及发动机的早燃、回火等问题提出了不同的解决策略。最后,对混合动力工程机械和氢动力发动机的发展趋势进行了总结和展望。研究结果表明,这些措施都有较好的可行性。

关键词:混合动力;氢动力;工程机械;发动机

中图分类号:TK91;TH2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)11-1300-06

Research progress in hybrid power construction machinery and hydrogen engine

DONG Ning-ning, YIN Chen-bo, ZHANG Zi-li, ZHU Bin

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The hybrid power construction machinery and hydrogen engine are the typical and representative new developing and utilization energy engine. The research status, application in the engineering and automotive fields and the key technology of them were summarized. To reduce the power consumption further, the different solution strategies were proposed for the low energy recovery, fuel efficiency of construction machinery and early burning, backfire of hydrogen engine. The developed trends of the hybrid power construction machinery and hydrogen engine were summarized and prospected at last. The study result shows that these measures have good feasibility.

Key words: hybrid; hydrogen power; construction machinery; engine

0 引 言

“节能减排”是当今世界的主旋律,鉴于混合动力系统在汽车上的成功应用,其在工程机械上的应用以及氢动力发动机在汽车上的应用又被提上议事日程。美国向氢经济过渡的“2030 年远景展望报告 6”认为,石油资源可能在 25 年~30 年后就将枯竭^[1]。乐观地估计,到 21 世纪中期以后,石油资源也将面临枯竭的局面^[2-4]。日本、美国和欧洲一些发达国家和地区已经把混合动力系统应用在汽车上,并取得了较好的节能效果^[5-6]。

工程机械多采用“柴油机—液压系统—多执行器”驱动方案,耗油高、排放差,而近年来逐渐发展起来的混合动力系统(Hybrid)因其在节能减排方面表现出来的突出效果受到了工程机械领域的高度重视。

氢是一种极为优越的新能源,内燃机燃用氢气完全可以获得与燃用汽油相似的运行性能^[7],其主要优点有:

(1) 燃烧热值高,氢的单位质量放热量为 120 975 kJ/kg,约为汽油的放热量的 2.8 倍多。氢的辛烷值高达 130,而高级汽油的辛烷值只有大约 93,因此它的自燃温度很高,在发动机气缸的压缩过程中抗

收稿日期:2011-05-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875122);江苏省自然科学基金资助项目(BK2007185);江苏省高校自然科学基金资助项目(07KJB460044)

作者简介:董宁宁(1987-),女,山东潍坊人,主要从事机械设计及理论方面的研究。E-mail:dongningning00@yahoo.com.cn

通信联系人:殷晨波,男,教授,博士生导师。E-mail:yinchenbo@njut.edu.cn

提前燃烧(敲缸)的能力强。

(2) 氢燃烧后生成水,又回归大自然,没有公害,稀的氢气与空气混合,发动机仍然可以获得高的热效率,由于燃烧温度低,可防止生成 NO_x 。

(3) 氢气着火范围大,在过量空气系数为 0.9~3.3 范围内都可以实现有效燃烧,有效可燃范围甚至可达 8.3^[8]。

(4) 资源丰富,氢气可以由水制取,而水是地球上最为丰富的资源。荷兰皇家壳牌公司负责企业发展的副总裁菲力普·白克斯利也表示,“我们可以选择从进口的天然气那里抽取氢能,或是从我们自己出产的煤炭,或者是从生物自然资源,或者是从太阳能、风中获取氢能。”

本研究概述了混合动力工程机械与氢动力发动机的研究进展。

1 混合动力工程机械与氢动力发动机

1.1 混合动力工程机械

混合动力是指通过两种不同动力源的联合工作,使其充分发挥各自的优越性以提高能量的利用率。混合动力系统结构主要有串联式、并联式和混联式 3 种^[9-11]:

(1) 串联式混合动力结构由发动机、发电机和电动机 3 部分组成,发动机驱动发电机发电,电能通过控制器输送到电池或电动机,由电动机通过减速机驱动车辆行驶。串联式结构布置灵活、控制简单,发动机工作不易受到工况的影响,但机械效率较低,很难达到明显降低油耗的目的,目前主要用于城市大客车。

(2) 并联式装置的发动机和电动机可以分别独立地向传动系提供扭矩,在不同工况下既可以共同驱动又可以单独驱动。电动机既可以作电动机又可以作发电机使用,以平衡发动机所受的载荷,使其能在高效率区域工作。并联式装置的机械效率损耗与普通传动差不多,因此得到比较广泛的应用。但是由于发动机和驱动轮采用机械连接,发动机并不能总是运行在最佳工况点,车辆的燃油经济性比串联时要差一点。

(3) 混联式混合动力驱动由于其系统的布置和控制都比较复杂^[12-14],目前还没有开展在工程机械上的应用研究。

目前混合动力方案普遍采用的是油电混合的解决方案,借助蓄电池、超级电容等储能元件,实现柴油机输出功率和扭矩的均衡控制,达到用功率较小的柴油机来驱动大吨位挖掘机的目的。浙江大学流体传动及控制国家重点实验室对比了串联和并联混合动力在工程机械中的节能效果,并分别将马达能量回收、

单独驱动、电动机直接驱动回转和进出口独立调节等节能措施与并联混合动力系统相结合,进行了燃油消耗的理论计算和节能效果的评价,其结论对工程机械的节能研究具有指导意义。

1.2 氢动力发动机

当前以氢作为燃料的汽车主要有两种形式:①以燃料电池的形式,就是让氢气和氧气在特殊的催化剂的作用下发生电化学反应;②氢内燃机(hydrogen internal-combustion engine)基本原理与普通的汽油或者柴油内燃机的原理一样,是基本的“汽缸—活塞”式的内燃机,同样是按照:“吸气—压缩—做功—排气”4 个冲程来完成化学能对机械能的转化,只是氢内燃机里作为燃料的是氢气。与燃料电池驱动系统相比,用氢燃料直接驱动的发动机价格低、功率大、重量轻及对传统发动机结构做不大改动就可以直接燃烧氢气,且对原车传动系统的改变也小,因此是最经济实用的车用氢能应用解决方案。

李明海等人利用 GT-Power 建立了 EQD180N-30 整机模型,针对 1 600 r/min 等进气管绝对压力为 120 kPa 情况下掺氢比不同对发动机性能进行了分析,通过仿真在不掺氢和体积掺氢比 10%、20%、30% 情况下,过量空气系数(α)和不同点火提前角对发动机的 NO_x 排放和扭矩的影响,得到了在体积掺氢比为 20% 时,过量空气系数为 1.25 时,点火提前角为 24° CA,发动机获得最佳的动力性和排放性。

上海交通大学动力与能源工程学院研究发现在过量空气系数 $\alpha=0.5\sim 3.5$ 范围内,氢气发动机都可以正常工作,燃料可调节的范围大,并且可以贫燃运行,氢气机燃烧终点压力的变化与燃料的性质无关,其理论循环热效率与燃料的性质无关,应与常规燃料的理论循环热效率相当。在 $\alpha=1.0$ 和 $\alpha=3.5$ 时,氢气机燃烧终点的压力都出现较显著的变化,在氢气机的实际循环中这两个工作点可能会出现工作的不稳定或异常情况。

浙江大学动力机械及车辆工程研究所的杨振中等建立了以点火提前角、喷氢提前角和喷氢量为控制变量,分别以动力性、经济性为性能指标泛函,以 NO_x 排放不超标、不发生早燃、回火等异常燃烧为约束条件的氢燃料发动机电控试验系统(如图 1 所示),为氢

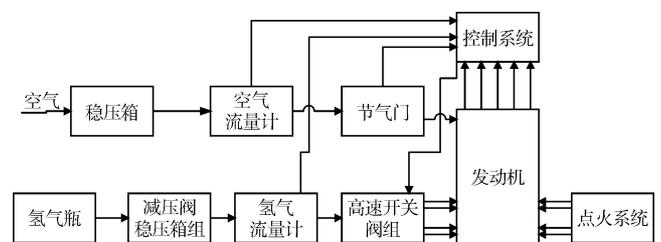


图 1 氢燃料发动机电控试验系统

燃料发动机优化控制提供了理论基础。吉林工业大学内燃机研究所在汽油掺烧氢的研究中发现这样可同时进行提高发动机性能及降低废气排放^[15]。

2 混合动力系统和氢动力发动机的应用

2.1 混合动力系统在工程机械上的应用

2003年,日立建机生产出了世界上第一台混合动力驱动的轮式装载机(Wheel Loader),这是混合动力系统在工程机械上的首次应用。2004年5月,小松研制出了世界上第一台混合动力液压挖掘机的试验机。2008年6月,小松又率先推出世界首台20吨PC200-8型混合动力挖掘机,采用并联式混合动力系统,在日本进行试运行,核心部件包括小松新开发的电动机(用于车身回转驱动)、发电机、电容器和康明斯6.7L QSB系列电控柴油发动机。与普通型液压挖掘机相比,可降低约25%的能源消耗。

日本神钢研制的混合动力挖掘机已于2006年4月在INTERMAT展会上展出,并于2007年1~5月在日本投入使用,通过使用证明,在达到普通挖掘机操作性的同时,该机降低了40%的耗油量。贵州詹阳动力重工在9th BICES展会上推出的JYL621H混合动力环保型轮式挖掘机在微电脑控制、蓄电池能源管理及逆变控制等方面取得突破,具有高效、节能、低排放、低噪音、低振动等特点。沃尔沃第一种采用了混合动力技术的L220F轮式装载机于2008年3月正式亮相,该产品的节油率达10%。

凯斯工程机械公司在Intermat 2009上展示了一款带Hybrid油电混合动力的物料处理挖掘机原型机。这是一款带升降驾驶室的废料处理机,设计将减少40%的燃料消耗,并显著降低废气排放水平。当发动机处于低负载状态时,剩余能量会被转化成电力储存在高效电容器中;而当发动机处于高负载工作时,电力系统会释放储存的电力,使发动机保持恒定运转速度,从而减少燃油消耗并降低噪音。

2008年CONEXPO博览会上,卡特彼勒展示了在其畅销的D7型推土机基础上研发出来的柴油-电动变型产品D7E履带式推土机电驱动系统,该系统采用串联结构,柴油机与发电机一起工作,没有机械变速器,驱动机器的是交流变速电动机,取代了原来的液力机械传动方式。D7E净功率为175 kW,整车质量26 762 kg,与原型号D7相比,D7E电驱动系统每小时可节油20%,提高生产率10%,降低操作运行成本10%,延长传动系统寿命50%,还可改善操纵性能。

2.2 氢动力发动机在汽车上的应用

最先提出和研究氢动力发动机的是英国人里卡图,当时他提出氢气可以用很稀的混合比燃烧,热分解和冷却损失少,热效率高,但是由于当时没能解决大负荷时的异常燃烧,进气管回火现象未能很好地排除,故其氢动力发动机没能彻底完成。20世纪后期以来,美国、德国、日本和俄罗斯等国家掀起了对H₂燃料发动机的研究热潮。

德国宝马汽车公司对采用氢气燃料发动机汽车产品已进行了10年的开发,多次展出自己研发的氢气燃料汽车,2003年已有多辆宝马牌750 hL型氢气燃料发动机汽车在柏林市投入使用。而氢动7系列是真正变革性的发展,它采用双燃料模式发动机,即在同一个气缸中既可用氢燃料运行也可用汽油运行,精确的控制和管理技术能够毫不延迟地立即从氢燃料切换到汽油。这款车在氢驱动模式下可行驶为200 km以上,另外还可以在汽油驱动模式下行驶500 km。因此驾驶者即使远离加氢站也不会对出行造成任何影响。在目前的条件下双模驱动绝对是使氢动力获得真正突破口的唯一切实可行的解决方案。宝马氢能7的动力单元排量为6 L,最大输出功率为191 kW,在4 300 r/min的发动机转速下,最大扭矩可达390 N·m。从而使它从静止到加速至100 km/h仅需9.5 s,电子限制的最高车速为230 km/h,采用氢和汽油时均是如此。

日本在氢动力发动机上的研究一直走在世界汽车工业的前端,仅武藏工业大学就有9种不同型号的液氢动力车研制成功。其中古滨庄一教授研制的直接喷射低温氢气火花点火二冲程氢气发动机(如图2所示)是三缸发动机,总排量539 mL,有效压缩比6.9:1。该发动机除了取得高效率 and 有效防止了进气管回火

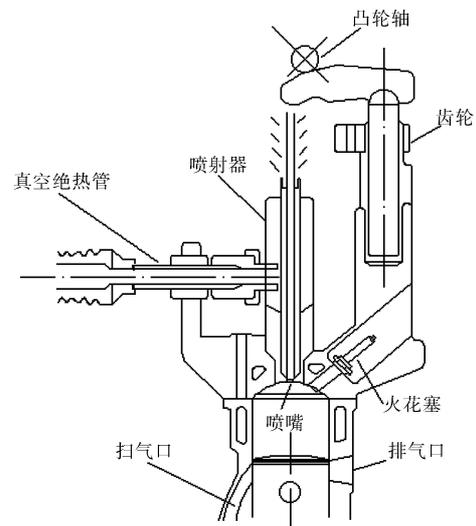


图2 武藏工业大学的二冲程氢气发动机

之外,由于二冲程发动机原本 NO_x 的排放量就少,再加上采用了排气再循环(EGR)使氢气发动机唯一的有害排放物 NO_x 更低了,同时也消除了二冲程发动机由于扫气而引起的燃料损失,从而使其热效率得到了充分的提高。该发动机被装上小汽车,时速达 135 km,还送到美国参加了展示和实验,进行了 2 800 km 的拉力赛。

世界上一些汽车公司也一直致力于氢内燃机研究,并投入使用。马自达公司早在 1991 年就研制成功了氢转子发动机原型车,在 2004 年底特律车展上马自达公司展出 RENESIS 氢转子发动机汽车 RX-8, RX-8 装备了双燃料系统,包括高压氢储气筒和单独的汽油箱,该系统既可以使用氢燃料又可以使用汽油燃料,使用这两种燃料具有相同的操作可靠性和方便性;MAN 公司在 1996 年就生产出第一代氢内燃机公共汽车投放于德国 Erlangen 运行;美国 Ford 汽车公司同时进行氢动力汽车和燃料电池汽车的研发,2004 年 10 月 12 日发布了据称是世界上最清洁的氢气内燃发动机,他们研究成功的氢内燃机车型包括 P2000,Focus C-M3XH2ICE 以及新款 U 型概念车等。其中新款 U 型车采用氢内燃机混合电力驱动,2.3 L 四缸直喷内燃机,当量燃油消耗量低于 5 L/100 km,燃油效率比汽油机提高 25%,可提供 483 km 的续行里程,同时达到近零排放,CO 减少 99%;美国通用汽车公司在致力于氢气燃料电池汽车的同时,也开始支持氢气发动机汽车的研究。

3 混合动力工程机械与氢动力发动机中的关键技术

3.1 混合动力工程机械中的关键技术

3.1.1 能量的回收

工程机械各机型中仅采用机械式变速器的机型可以设计制动能量回收系统,而液力传动的机型则无法实现。但是,工程机械的液压系统可以经过特殊设计以液压马达对回油流量进行能量回收,在保证系统可操纵性的前提下,利用液压马达进行能量回收可以减小主控阀的节流损失,调节执行元件回油腔的背压,控制执行元件的运行速度,将执行元件回油的液压能通过回收液压马达转化为机械能或电能以便被系统重新利用。

挖掘机在工作过程中,动臂、斗杆和铲斗的上下摆动以及回转机构的回转运动比较频繁,又由于各运动部件惯性都比较大,减速制动时会释放出大量的能量。这部分能量通常都消耗在液压阀的阀口上,不仅浪费了能量,还会导致系统发热和元件寿命的降低。

为了减少能量损耗和系统发热量,提高元件的寿命,能量回收成为液压挖掘机节能降耗的一项有效措施。比较典型的混合动力液压挖掘机能量回收方案如图 3 所示,利用电池和电容作为蓄能元件,采用了回转机构的能量回收和动臂液压缸的能量回收两种能量回收方法。

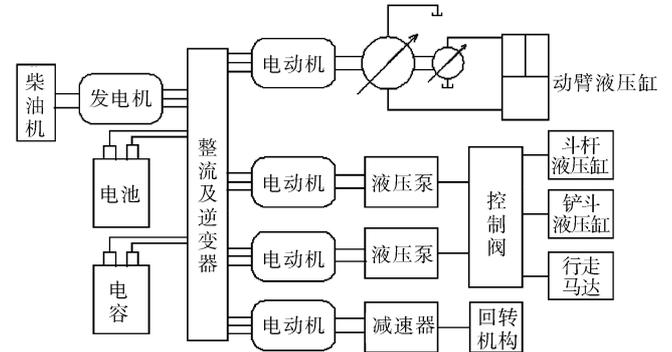


图 3 混合动力液压挖掘机能量回收方案

3.1.2 燃料利用率和排放

混合动力工程机械由于负载变化比较频繁、波动比较大,使得柴油机大多数时间工作在非高效区内,燃料的利用率低下,排放质量较差^[16]。因此,改善柴油机的工作状况是提高整体系统效率和改善排放质量的一个关键问题。

中国石油大学(华东)的张彦廷等利用 Matlab 系统建立了混合动力挖掘机的整机仿真模型,在一个标准挖掘周期内对燃油发动机的油耗和装机功率等关键参数进行了仿真计算。研究表明,采用混合动力驱动可以保证燃油发动机工作在高效区内,使燃油燃烧充分,提高了其燃油利用率,降低了排放,但单纯地采用混合动力驱动,由于能量转化环节多、损耗大,致使节能效果不明显;多泵多回路系统可以有效地降低液压系统的压力补偿损失,提高液压系统的工作效率。进一步研究表明,采用并联式混合动力技术和电动机驱动回转的三泵驱动方案可以获得较好的节能效果。

本研究在汽车尾气排放监测系统的基础上设计了一套适用于工程机械上的尾气排放监测系统(如图 4 所示),并结合 SY215C8M 液压挖掘机的性能参数进行了动态仿真,取得了很好的减排效果。

该尾气排放监测系统安装在挖掘机尾气排放管的上方,在燃料电池工作时可实时监测尾气中的 CO_2 、NO 等的含量,并能向控制单元发出电信号,进一步操纵燃料电池组的工作状态。

该系统主要由传感器检测单元(图中元件 8、10、11、12)、废气检测室(图中元件 1、6、13、14)、遮断装置(图中元件 2、3、4、5)、控制单元(图中元件 7、9)组成。

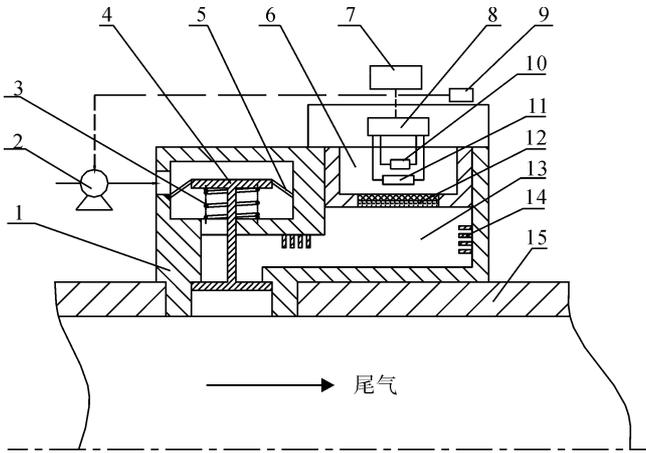


图 4 工程机械尾气排放监测系统

1—缸体;2—压缩机;3—压缩弹簧;4—阀体;5—密封膜;
6—检测室;7—电子控制单元;8—控制电路板;9—点火控制器;
10—传感器阵列;11—加热器;12—过滤器;13—尾气吸纳室;
14—棱;15—尾气排放管

传感器阵列、控制电路板、电子控制单元(ECU)、点火控制器(IG)、压缩机均电连接。

系统工作原理:若点火控制器(IG)为 ON,则燃料电池系统启动,燃料电池组开始发电。ECU 获得 IG 的信号后启动压缩机,压缩气体压缩遮断装置的阀体,从而打开尾气吸纳室入口。尾气经过过滤后进入检测室,传感器阵列检测单元对尾气中的 CO_2 、 NO 等气体的含量进行实时检测,并将检测出的电信号送到。ECU 对电信号与预设值作出比较判断后,向点火控制器(IG)发出 ON 或 OFF 信号,从而控制燃料电池组工作与否。

该系统能在燃料电池挖掘机工作时实时监测尾气排放中空气污染物的含量,在污染量含量超标时能发出相应的控制操作信号。由此可见,在燃料电池工程机械尾气排放管上安装此系统,可大大减少有害气体的排放。

3.2 氢动力发动机中的关键技术

3.2.1 氢气的储运

在通常状况下, H_2 是无色、无味、无臭的气体,沸点为 $-253\text{ }^\circ\text{C}$,极难溶解于水,相同热值的氢与汽油的重量比为 0.37,而气态氢在室温下的体积却是液态汽油的 3 000 倍,所以氢的储存是最关键的技术问题。目前关于氢的储存方法主要有高压罐储氢、液化储氢、玻璃微球储氢、金属氢化物储氢、吸附储氢以及无机物及有机化合物储氢等 6 种:

(1) 高压罐储氢。对于氢燃料电池汽车来说,若要满足车辆行驶里程的需要,储氢压力应在 80 MPa 左右。钢瓶的壁厚可根据下式计算:

$$\frac{d_w}{d_o} = \frac{\Delta p}{2 \times \sigma_v + \Delta p}$$

式中: d_w —壁厚, d_o —钢瓶的外径, Δp —过压, σ_v —材料的伸张强度。

通过压缩方式使用高压氢气瓶储存氢对环境污染很小,使用比较安全。不足之处是,即使在非常高的压力下,储存氢的质量也非常低,并且压缩氢的成本很高。利用压缩盛装氢气的“K”bottle 气瓶如图 5 所示。

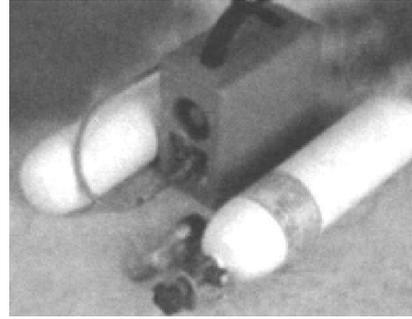


图 5 “K”bottle 储氢容器

(2) 液化储氢。在常压和 $-253\text{ }^\circ\text{C}$ 下,气态氢可液化为液态氢,液态氢的密度是气态氢的 845 倍。体积能量密度比压缩储存要高好几倍。因此,液氢储存工艺特别适宜于储存空间有限的运载场合,如航天飞机用的火箭发动机、汽车发动机和洲际飞行运输工具等。虽然储存成本贵,安全技术也较复杂,但在 22 K 左右的温度下以液态形式储存氢,是目前唯一使用最广泛的大规模储氢方式^[17]。

(3) 玻璃微球储氢。在高压下 (10 MPa ~ 200 MPa),加热至 $200\text{ }^\circ\text{C}$ ~ $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的氢气扩散进入空心玻璃球(直径在几十至几百微米之间)内,然后等压冷却,氢的扩散性能随温度下降而大幅度下降,从而使氢有效地储存于空心微球中。其技术难点在于制备高强度的空心微球和选择最佳的加热方式,以确保氢足量释放。

(4) 金属氢化物储氢。可逆金属氢化物储氢虽然具有较高的容积效率且使用安全,但质量效率较低,氢的不可逆损伤使得这种方法在实际应用中很少。

(5) 吸附储氢。吸附储氢是近年来出现的新型方法,由于其具有安全可靠和储存效率高等特点而发展迅速。吸附储氢方式分为物理吸附和化学吸附两大类,其中所使用的材料主要有分子筛、高比表面积活性炭和新型吸附剂(纳米材料)等。由于该技术具有压力适中、储存容器自重轻、形状选择余地大等优点,已引起广泛关注。

(6) 无机物及有机化合物储氢。一些无机物(如 N_2 、 CO 、 CO_2)能与 H_2 反应,其产物既可以作燃料,又可分解获得 H_2 ,是一种目前正在研究的储氢新技术。如碳酸氢盐与甲酸盐之间相互转化的储氢反应为:



该方法的主要优点是便于大量地储存和运输,安全性好,但储氢量和可逆性都不是很好。有机物储氢是借助不饱和液体有机物与氢的一对可逆反应,即利用催化加氢和脱氢的可逆反应来实现。

3.2.2 早燃和回火

氢气发动机由于 H_2 燃料与石油燃料的物化特性有明显的差异,若按传统发动机的理论和实践来组织 H_2 发动机的混合气形成和燃烧,将出现严重的回火、早燃等异常燃烧,并产生较多的 NO_x (H_2 燃料发动机的唯一有害排放物)。新鲜充量氢气在未被火花塞点燃时与燃烧室内局部温度过高的一些“热点”(如火花塞、排气门和积炭)相接触引起燃烧的现象称为早燃。回火是指混合气在进气管内燃烧的现象。早燃和回火严重制约了氢发动机的发展,抑制早燃和回火对氢发动机的设计、混合气形成及负荷控制具有重要意义。

用液氮冷却氢气和空气而供发动机的实验系统如图 6 所示,利用液氮的低温冷却进气来增加空气的充量,不仅可以得到较大的功率,还可以达到稀薄燃烧的目的。若气缸内充分吸入空气后再喷入氢气,同时在进气门关闭后向气缸内喷入氢气,可以完全避免进气管回火的发生。

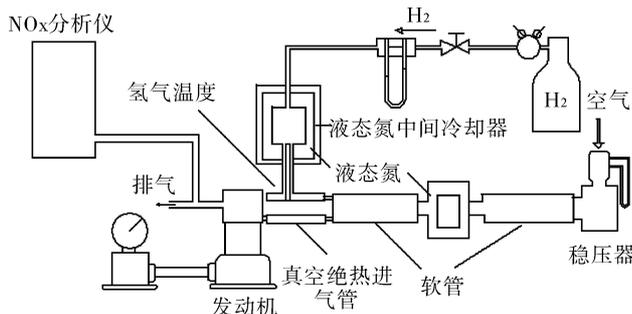


图 6 用液氮冷却氢气和空气而供发动机的实验系统

研究表明^[18],以点火提前角、喷氢提前角和喷氢量为基本控制变量的优化控制技术,是全面改进氢发动机性能的有效手段。高压喷射氢燃料发动机可以避免发生回火、早燃,而且压缩比可提高至 12~15,从而提高功率和改善热效率,且可以适用于大缸径发动机。因此,氢发动机的早燃、回火等异常燃烧的控制以及 NO_x 的抑制,是提高功率、改善燃烧效率,保证发动机的正常燃烧所需要解决的关键技术。合理控制喷氢正时和喷氢量,使其随发动机运行工况变化而动态调整优化,不仅可以有效改善氢发动机经济性、动力性及排放特性,而且也是抑制异常燃烧的基础^[19-21]。首尔国立大学 S.J.Lee 教授研究结果表明^[22],通过精确控制进气口喷气系统的喷气定时可以抑制早燃和回火。

江苏大学汽车与交通工程学院的王忠等设计了

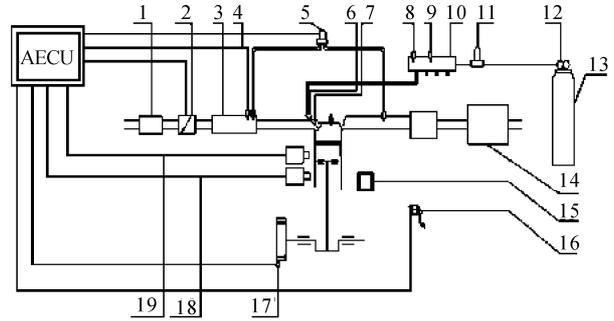


图 7 氢燃料发动机燃气供给系统

1—空气滤清器;2—电子节气门;3—进气总管;4—空气压力/温度传感器;5—废气再循环(EGR)阀;6—氢气喷射阀;7—氢气引管;8—氢气压力传感器;9—氢气温度传感器;10—氢气稳压气轨;11—氢气过滤器;12—减压阀;13—高压氢气瓶;14—消声器;15—曲轴箱通风阀;16—油门踏板位置传感器;17—曲轴位置传感器;18—凸轮轴位置传感器;19—冷却水温传感器

氢燃料发动机燃气供给系统(如图 7 所示),氢气从高压气瓶(0.5 MPa~10 MPa)经两级减压器减压至 0.3 MPa 经氢气滤清器过滤后进入氢气稳压气轨,通过控制与氢气稳压气轨相连的氢气喷射阀的开启时刻和开启时间实现发动机的定时、定量供气,可有效防止早燃和回火现象的发生。

4 结束语

混合动力工程机械在目前新型清洁动力工程机械中最具产业化和市场化,尾气排放质量的控制、布局安排的简单化、生产成本的控制、元件性能的提高以及能量回收利用率的提高等是混合动力工程机械今后在节能减排方面的几个突破点。

氢气以其优异的物理化学性能当之无愧的成为发动机的理想燃料,因此发展先进的、有价格竞争力的制氢技术势在必行,例如利用太阳能从水制取 H_2 的技术;此外氢动力发动机在氢气的储运和早燃、回火问题的有效控制等方面还有待进一步的研究提高。相信氢动力发动机在不久的将来会主导车、船以及大型工程机械燃料的潮流。

参考文献(References):

- [1] 中国科技信息研究所. 美国大做氢经济文章[EB/OL]. [2005-02-02]. <http://www.materialsone.com>.
- [2] HUBBERT M K. The energy resources of the earth[J]. *Scientific American*, 1971(6):6238.
- [3] ROTTEGRUBER H, BERCKMILLER M, ELSSER G. 直接喷射点燃式氢气发动机,运行对策和功率密度潜力[J]. *国内外内燃机*, 2005, 37(4):16-24, 36.
- [4] 朱亚杰,孙兴文. 能源世界之窗[M]. 北京:清华大学出版社, 2001.

(下转第 1309 页)

参考文献(References):

- [1] 刘耀林,张舜德,李华. 喷雾器喷嘴流场仿真研究[J]. 轻工机械,2008,26(1):20-23.
- [2] 闫云飞,张力,高振宇,等. 低压旋流雾化喷嘴的雾化性能[J]. 化工学报,2009,60(5):1141-1147.
- [3] 尹俊连,焦磊,仇性启,等. 旋流喷嘴内部流场的数值模拟和实验研究[J]. 浙江大学学报:化学版,2009,43(5):968-972.
- [4] 冉景煌,张力,辛明道,等. 渐扩切向槽式低压旋流喷嘴流场数值模拟[J]. 工程热物理学报,2002,23(5):586-588.
- [5] 石庆宏,叶世超,张登平,等. 旋转压力式喷嘴喷雾特性的实验研究[J]. 高校化学工程学报,2005,19(6):851-854.
- [6] 周华,朱畅,范明豪,等. 高压旋芯喷嘴的雾化特性[J]. 农业机械学报,2006,37(1):63-66.
- [7] 周文会. 高压水射流喷嘴内外流场的数值模拟研究[D]. 兰州:兰州理工大学机械电子工程学院,2008.
- [8] PARK K S,HEISTER S D. Nonlinear modeling of drop size distributions produced by pressure-swirl atomizers[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010(36):1-12.
- [9] NUYTENS D,BAETENS K,SCHAMPHELEIRE M D,et al. Effect of nozzle type,size and pressure on spary droplet characteristics [J]. *Biosystems Engineering*,2007 (97):333-345.
- [10] PAINE M D,ALEXANDER M S,JOHN P W. Stark nozzle and liquid effect on the spray model in nanoelectrospray[J]. *Journal of Colloid and Interface Sciences*,2007(305):111-123.
- [11] 刘广文. 喷雾干燥实用技术大全[M]. 北京:中国轻工业出版社,2001.
- [12] 濮亚楠. ECPE 有效热效率和燃油消耗特性仿真[J]. 现代制造技术与装备,2010(4):30-32.
- [13] 高振宇. 液固两相低压旋流雾化喷嘴数值模拟与实验研究[D]. 重庆:重庆大学动力工程学院,2006.
- [14] 刘志超. 直通式旋流细水雾喷嘴雾化理论分析及灭火实验研究[D]. 成都:西南交通大学机械工程学院,2007.
- [编辑:张翔]
-
- (上接第 1305 页)
- [5] GOKDERE L U,BENLYAZID K,DOUGAL R A,et al. A virtual prototype for a hybrid electric vehicle [J]. *Mechatronics*,2002(12):575-593.
- [6] BAUMANN B M,WASHINGTON G,GLENN B C,et al. Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*,2000,5(1):58-72.
- [7] BERCKMLER M,ROTTENGNEBER H, AETAL E. Potentials of a Charged SI-Hydrogen Engine [N]. SAE Paper,2003.
- [8] TANG Xiao-guo,KABAT D M,NATKIN R J,et al. Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development [C]. SAE,2002.
- [9] ENDO H,ITO M,OZEKI T. Development of Toyota's transaxle for mini-van hybrid vehicles[J]. *JSAE Review*, 2003(24):109-116.
- [10] CHAU K T,WONG Y S. Overview of power management in hybrid electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*,2002(43):1953-1968.
- [11] ROBERT F N. Power requirements for batteries in hybrid electric vehicles[J]. *Journal of Power Sources*,2000(91):2-26.
- [12] 俞明,罗玉涛,黄榕清. 一种混联式电动汽车驱动系统[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2001,29(8):90-92.
- [13] 沈继军,俞明,黄榕清. 一种混联式混合动力汽车驱动系统的性能分析 [J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2002,30(6):94-97.
- [14] AKIHIRO K,TETSUYA A,SHOICHI S. Drive force control of a parallel-series hybrid system[J]. *JSAE Review*, 1999(20):337-341.
- [15] 姚春德,李云强. 甲醇燃料在柴油机中的应用与发展[J]. 小型内燃机与摩托车,2004 (1):37-40.
- [16] 乔建刚,杨敦荣. 液压挖掘机的节能技术[J]. 现代机械, 2002 (2):78-80.
- [17] 拉米尼,迪克斯. 燃料电池系统-原理·设计·应用[M]. 朱红,译. 2版.北京:科学出版社,2006.
- [18] YANG Zhen-zhong. Combustion and Optimizing Control in a Hydrogen Fueled Engine [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2001.
- [19] AKAGAWA H,HIROYUKI I I,OSAFUNE S, et al. Development of Hydrogen Injection Clean Engine[M]. Yokohama:[s.n.],2004.
- [20] VERHELST S,ASPECTS S R. Concerning the Optimisation of a Hydrogen Fueled Engine [M]. Beijing:[s.n.],2000.
- [21] YANG Zhen-zhong,LI Jing-ding. Research on the optimizing control technology based on fuzzy neural network for hydrogen fueled engines [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2006,31 (15):2370-2377.
- [22] LEE S J,YI H S ,KIN E S. Combustion characteristics of in take port injection type hydrogen fueled engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,1995,20(4):317-322.
- [编辑:张翔]