

国内高校重点实验室火箭发动机发展现状

朱一骁^{1,2},王申^{1,2},白雪蕊^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所,上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心,上海 201112)

摘要:火箭发动机技术是航天技术的重要组成部分,随着现代航天事业的发展,国内外开展了大量针对火箭发动机的研究工作。介绍国内高校重点实验室在液体火箭发动机、固体火箭发动机及电火箭发动机等方面的发展现状,为相关领域研究人员的预研、方案论证、设计、型号研制、发展规划等工作提供参考。

关键词:国内高校;重点实验室;火箭发动机;发展现状

中图分类号:V43 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)05-0206-02

Development Status of Rocket Engine Technology in Key Laboratories of Domestic Universities

ZHU Yixiao^{1,2}, WANG Shen^{1,2}, BAI Xuerui^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: In the development of modern space industry, rocket engine technology plays an important role in space technology, on which research has been carried out at home and abroad. The development status of liquid rocket motor, solid rocket motor and electric rocket motor technology in the key laboratories of domestic universities are introduced, providing support for researchers in related fields for their pre-research, scheme demonstration, design work, model research and development plan.

Keywords: domestic university; key laboratory; rocket engine; development status

0 引言

“航天发展,动力先行”,火箭发动机技术是航天技术的重要组成部分。常用的火箭发动机类型主要有液体火箭发动机、固体火箭发动机和电火箭发动机^[1]。随着现代航天事业的发展,国内外开展了大量针对火箭发动机的研究工作,本文主要介绍国内高校重点实验室火箭发动机技术领域的发展现状,为相关领域研究人员的预研、方案论证、设计、型号研制、发展规划等工作提供支持。

1 液体火箭发动机

在液体火箭发动机领域,国防科技大学高超声速冲压发动机技术重点实验室取得了显著的研究成果,其中,以李清廉团队的研究成果尤为显著。李清廉教授是国防科技大学百千万人才工程国家级人选,其团队的科研成果主要集中在喷嘴的流动雾化特性^[2-6]。近年来,李清廉团队将喷嘴研究成果应用于液体火箭发动机方面,取得了显著的成果,尤其在变推力液体火箭发动机方面较为突出。成鹏等^[7]设计了一套可变流量的火箭发动机试验系统,采用煤油作为燃料,在极度富燃条件下进行了点火试验,试验实现了火箭发动机全局混合比从 0.405~0.690 的连续调节。从试验结果中可以看出:1)混合比由 0.405 增大到 0.690 的过程中,燃烧室压力先增大后减小;2)在混合比 <

0.535 时,燃烧效率对燃烧室压力的影响占主导,混合比 > 0.535 时,燃料流量对燃烧室压力的影响占主导。

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室^[8],针对现有在姿轨控液体火箭发动机动态小推力测量方面技术不成熟的现状,从理论分析、仿真和实验等方面对动态推力测试系统的设计、分析进行了深入研究,设计了推力动态测试系统并进行动力学建模,采用模态分析理论研究系统的动态性能,通过幅频特性与相频特性分析,为该系统在微阻尼条件下测试的不失真提供了理论依据。结合该模型,对测试信号进行傅里叶变换,通过系统幅相频特性与不同频率信号进行代数运算的方法,求得了测试系统动态测试误差,从理论上证明测试系统动态性能满足设计要求。

西安交通大学的动力工程多相流国家重点实验室在火箭发动机冷却方面取得了大量的研究成果,其中,以王秋旺团队尤为显著。王秋旺教授为国家杰出青年基金获得者、国务院政府特殊津贴获得者、教育部热科学与工程国际合作联合实验室执行主任及科技部热科学与工程国际联合研究中心负责人,其团队在火箭发动机再生冷却方面的研究成果在国内外期刊中均可以查询到^[9-13]。吴峰等^[14-17]应用气固耦合方法对液体推进剂火箭发动机再生冷却推力室通道的流动与传热进行了三维数值模拟。计算结果表明:喉部附近的推力室温度和热流密度最高,增大通道深宽比对推力室壁面能够起到强化传热的作用,但

同时也增加了冷却通道的进出口压差。

2 固体火箭发动机

在固体火箭发动机领域,研究成果主要集中在西北工业大学的燃烧、流动和热结构国家级重点实验室,该实验室是经国防科工委批准,由国家投资建设的国家级重点实验室,于1995年12月建成。自建成以来,试验室完成了百余项课题研究,在国内外刊物及国际性学术会议上发表大量研究论文,其中一个比较有名的是金属粉末燃料对火箭发动机燃烧性能影响的研究。邓哲等^[18]建立了混合动力火箭发动机试验系统,选取Mg和Al作为金属粉末燃料,N₂O作为氧化剂,通过试验对发动机燃烧效率影响因素进行了研究。试验中,Mg/N₂O的燃烧效率在燃烧室压强0.5MPa的情况下高达96.4%,Al/N₂O在0.91MPa的情况下达到88.5%。同时,试验结果表明,提高燃烧室压强、颗粒滞留时间,可提高燃烧效率。王立武等^[19]对高横向过载下固体火箭发动机内燃气流动中粒子冲刷和局部聚集问题开展研究,研究采用理论分析和试验验证相结合的方法,验证了科氏加速度和导弹法向牵连加速度对发动机横向过载的影响。同时,试验结果表明:横向过载将引起Al₂O₃粒子向发动机局部聚集,引起喷管收敛段局部烧蚀增大,且增大的方向与离心过载方向呈一定的环向偏转角度。

同时,围绕固体火箭发动机羽流特性进行的研究也取得了显著的成果,其中的典型为徐义华等^[20]对固体火箭发动机羽流在特定光谱内红外辐射特性的研究,其通过计算比较了羽流辐射作用的强度以及羽流场不同位置点的入射辐射强度。通过计算结果可以看出,不同羽流位置点的光谱辐射强度和波长变化规律一致,辐射强度随波长的增大而减小;观测方向与羽流轴线夹角的方位角增大,红外辐射强度减小。

3 电火箭发动机

在电火箭发动机领域,大量研究成果主要出自哈尔滨工业大学的等离子体推进技术实验室。该实验室成立于2002年,隶属于电驱动与电推进技术教育部重点实验室。实验室立足于国家航天工程需求,以等离子体推进技术为主要研究领域,围绕电推进基础理论、电推进工程设计方法及关键技术开展研究,致力于从效率、比冲、寿命、可靠性、控制精度等方面大幅提升航天器的技术水平。其中,李鸿等^[21]针对霍尔推力器放电通道壁面过热、放电电流随时间增长越来越快的热失稳现象开展研究,研究对象为霍尔推力器结构中的磁路部分,主要目的在于研究磁路高温性质变化对霍尔推力器放电失稳的影响,研究以数值模拟研究为主。通过数值模拟可以看出,磁性材料的铁磁性受温度升高的影响导致场强衰减,从而进一步对电子能量各向分布、粒子密度分布等造成了影响,加剧了壁面等离子体沉积功率,导致磁路温度的持续增长。

李文博等^[22]针对空心阴极热子的失效问题开展研究,以数值模拟研究为主,主要目的在于评估阴极热子失效对阴极寿命的影响。通过数值模拟可以看出,阴极热子上沉积的功率随时间导数不断增加而持续升高,最终导致温度超过材料的熔点而快速熔断。同时,通过研究还发现,阴极

热子初始值的微小偏差会在退化过程中被剧烈放大。

欧阳磊等^[23]采用试验研究的手段,通过构建真空实验系统,研究了无热子空心阴极的冷启动过程中空心阴极的点火及放电特性的影响因素。通过试验结果可以看出,随着空心阴极点火电压逐渐升高,阴极冷启动过程存在最低稳定点火电压。同时还可以看出,随着供气流量的增加,点火电压逐渐下降,而较小的触持极-发射体间距更利于稳定可靠的冷启动。

4 总结与展望

本文在查询大量文献的基础上,完成了对国内高校重点实验室火箭发动机领域研究成果的调研工作。文章根据不同的火箭发动机类型,分别介绍了液体火箭发动机、固体火箭发动机和电火箭发动机领域内,国防科技大学高超声速冲压发动机技术重点实验室、大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室、西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室、西北工业大学燃烧、流动和热结构国家级重点实验室以及哈尔滨工业大学等离子体推进技术实验室等的研究成果。通过对国内高校重点实验室火箭发动机技术领域发展现状全面、系统的调研工作,可为相关专业研究人员正在开展的预研、方案论证、设计、型号研制、发展规划等工作提供有力的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 查理. 火箭发动机技术[J]. 国防科技,2004,25(6):6-10.
- [2] BAI X, CHENG P, LI Q L, et al. Effects of self-pulsation on combustion instability in a liquid rocket engine[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2020,114:110038.
- [3] KANG Z T, LI Q L, CHENG P, et al. Effects of recess on the self-pulsation characteristics of liquid-centered swirl coaxial injectors[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016,32(5):1124-1132.
- [4] BAI X, LI Q L, CHENG P, et al. Investigation of self-pulsation characteristics for a liquid-centered swirl coaxial injector with recess[J]. *Acta Astronautica*,2018,151:511-521.
- [5] KANG Z T, LI Q L, CHENG P, et al. Effects of self-pulsation on the spray characteristics of gas-liquid swirl coaxial injector[J]. *Acta Astronautica*,2016,127:249-259.
- [6] BAI X, SHENG L Y, LI Q L, et al. Effects of annulus width and post thickness on self-pulsation characteristics for liquid-centered swirl coaxial injectors[J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2020,122:103140.
- [7] 成鹏,李清廉,张新桥,等. 流量连续可调火箭发动机极度富燃燃烧特性[J]. 国防科技大学学报,2016,38(2):12-18.
- [8] 邢勤. 姿控火箭发动机脉冲推力测试系统研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.
- [9] PENG B, WANG Q W, ZHANG C, et al. An experimental study of shell-and-tube heat exchangers with continuous helical baffles[J]. *Journal of Heat Transfer*,2007,129(10):1425-1431.
- [10] WANG Q W, XIE G N, ZENG M, et al. Prediction of heat transfer rates for shell-and-tube heat exchangers by artificial neural networks approach[J]. *Journal of Thermal Science*, 2006,15(3):257-262.
- [11] WANG Q W, XIE G N, PENG B T, et al. Experimental study and genetic-algorithm-based correlation on shell-side heat transfer and flow performance of three different types of shell-and-tube heat exchangers[J]. *Journal of Heat Transfer*,2007,129(9):1277-1285.

(下转第225页)

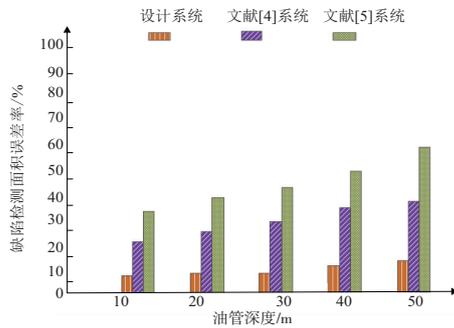


图9 三种系统的检测面积误差率

系统的误差率始终不超过 20%。文献[5]系统的误差率始终居高不下,最高误差超过 50%,文献[4]系统次之,而本文所设计系统保证误差不超 20%。这是因为在实现油套管缺陷检测前采用直流叠加和滤波处理,能去除所有影响信号误差的因素,更加清晰地检测出信号缺陷,从而检测出的油套管缺陷更加完整,以此降低了检测误差。

3.3 检测灵敏度

为验证系统的有效性,采用不同系统下对油套管产品缺陷检测灵敏度进行检测,得到结果如图 10 所示。

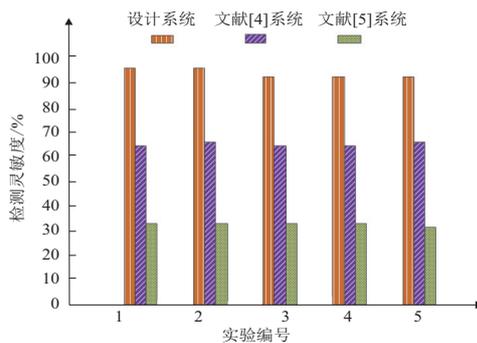


图10 不同系统的检测灵敏度

系统的检测灵敏度可说明系统的优劣,经过多次迭代得出图 10 数据,设计系统可检测的缺陷大小精确到 0.01 mm,从而得出设计系统的检测灵敏度趋近于 100%,其他两种系统由于各种原因灵敏度皆低于设计系统,这是因为所提方法利用直流放大器将信号放大,使得检测出的缺陷信号更加精确,进而在简便操作的基础上也能精确检测出缺陷信号,以此提高检测灵敏度。

4 结语

为解决目前所用方法的不足,提出数控车床加工油套管磨损缺陷自动检测系统设计方法。该方法首先设计出含有多个模块的硬件系统,在此基础上综合单独运行的多模块单例模式软件程序,实现油套管磨损缺陷自动检测。经试验表明,该方法能够有效提升油套管加工的产品合格率、降低缺陷检测误差率,提高检测灵敏度,降低了油套管加工成本,提高了效率。

参考文献:

- [1] 乔湘洋,王海芳,祁超飞,等. 基于机器视觉的线缆表面缺陷检测系统设计与算法研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(5):49-53.
- [2] 卢颖颖,孙育. 基于机器视觉的电镀件表面缺陷检测系统[J]. 电镀与环保, 2019, 39(2):59-61.
- [3] 刘国华,孙宝佳. 基于机器人视觉的坍塌缺陷检测系统[J]. 机械设计, 2019, 36(2):40-45.
- [4] 吴秀东,李东兴,常晓刚,等. 基于 Halcon 的钢球表面缺陷检测系统设计[J]. 轴承, 2018(10):53-58.
- [5] 王恒迪,郝琳博,杨建玺,等. 轴承外观缺陷检测系统的设计与实现[J]. 现代制造工程, 2018(5):156-161.
- [6] 马宗正,刘杰,潘高杰,等. 基于结构光表面缺陷检测系统设计与开发[J]. 现代制造工程, 2018(5):139-143.
- [7] 张文学,王继红,任戈. 光学元件缺陷在线检测光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5):779-785.
- [8] 李建明,杨挺,王惠栋. 基于深度学习的工业自动化包装缺陷检测方法[J]. 包装工程, 2020, 41(7):175-184.

收稿日期:2021-03-11

(上接第 207 页)

- [12] XIE G N, WANG Q W, ZENG M, et al. Heat transfer analysis for shell-and-tube heat exchangers with experimental data by artificial neural networks approach [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(5/6):1096-1104.
- [13] WANG Q W, CHEN G D, CHEN Q Y, et al. Numerical studies of a novel combined multiple shell-pass shell-and-tube heat exchanger with helical baffles [C]// Proceedings of ASME 2008 Heat Transfer Summer Conference Collocated With the Fluids Engineering, Energy Sustainability, and 3rd Energy Nanotechnology Conferences, Jacksonville, Florida, USA. 2009:23-31.
- [14] 吴峰,曾敏,王秋旺,等. 通道深宽比对液体火箭发动机推力室再生冷却的影响[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1):114-118.
- [15] 吴峰,王秋旺,罗来勤,等. 液体推进剂火箭发动机推力室再生冷却通道三维流动与传热数值计算[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4):707-712.

- [16] 吴峰,王秋旺,罗来勤,等. 液体火箭发动机推力室冷却通道传热优化计算[J]. 推进技术, 2006, 27(3):197-200.
- [17] 吴峰,王秋旺,罗来勤,等. 液体火箭发动机推力室冷却通道流动与传热数值研究[J]. 推进技术, 2005, 26(5):389-393.
- [18] 邓哲,胡春波,卢子元,等. Metal/N₂O 粉末火箭发动机实验研究[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2):220-224.
- [19] 王立武,田维平,郭运强,等. 固体火箭发动机燃气科氏加速度的影响分析[J]. 推进技术, 2019, 40(3):481-486.
- [20] 徐义华,胡春波,张胜敏,等. 固体火箭发动机羽流红外辐射特性研究[J]. 固体火箭技术, 2010, 33(2):176-181.
- [21] 李鸿,吴优,张兴浩,等. 磁路温度对霍尔推力器放电稳定性影响[J]. 推进技术, 2018, 39(1):231-240.
- [22] 李文博,胡俊锋,孙昊,等. 电推进空心阴极热子的寿命评估研究[J]. 推进技术, 2017, 38(9):2146-2151.
- [23] 欧阳磊,宁中喜,夏国俊,等. 无热子空心阴极冷启动特性研究[J]. 推进技术, 2016, 37(6):1195-1200.

收稿日期:2020-09-24