

电动泵压式发动机系统方案与性能评估

王 丹, 陈宏玉, 周晨初

(液体火箭发动机技术重点实验室, 陕西 西安 710100)

摘 要:提出了一套电动泵压式液体火箭发动机系统方案,编写了发动机评估程序,能够预估给定推力、混合比、室压条件下,发动机比冲及各组件质量。研究表明,电动泵发动机适合作为长时间工作的动力;存在与室压相关的临界时间点,系统工作时间大于该时间点时电动泵发动机相比燃气发生器循环质量更轻;室压大于 2 MPa,工作时间大于 317 s 时,电动泵系统具备质量优势。

关键词:质量评估;系统方案;液体火箭发动机;电动泵;燃气发生器;性能分析

中图分类号:V430-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)02-0028-05

System scheme and performance evaluation of an engine fed by electric pump

WANG Dan, CHEN Hongyu, ZHOU Chenchu

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory, Xi'an 710100, China)

Abstract: A system scheme of liquid rocket engine fed by electric pump is put forward. A program for engine performance evaluation is compiled, which could be used to predict the specific impulse of the engine and quality of each component under the conditions of given thrust, mixing ratio and combustion chamber pressure. The research results show that the engine fed by electric pump is suitable for the upper stage engine with long working hours, has a critical time point relevant to combustion chamber pressure, and its cycle mass is lighter than that of gas generator when working time is greater than the point. The electric-pump feed system always has the mass performance advantage when combustion chamber pressure is higher than 2 MPa and working time is longer than 317 s.

Keywords: mass evaluation; system scheme; liquid rocket engine; electric pump; gas generator; performance analysis

0 引言

电动泵压式液体火箭发动机(简称电动泵发动机)利用高能蓄电池和电机驱动泵对推进剂增压,

突破了传统的挤压模式和燃气涡轮泵增压模式^[1-2],具有贮箱压力低、结构质量轻、变推力范围大、工作模式灵活等优势^[3]。随着高能锂电池^[4-5]、高效精确步进电机^[6]等技术的迅猛发展,电动泵发

收稿日期:2017-06-14;修回日期:2017-07-10

基金项目:国家自然科学基金(51506157)

作者简介:王 丹(1989—),女,硕士,研究领域为火箭发动机系统

动机具有更加广阔的应用前景。

锂离子电池^[7-9]具备结构质量轻,功率密度大的特点,适合电动泵发动机。美国特斯拉公司生产的Model S纯电动汽车,采用了7 000多节NCR18650A改性三元锂电池,电池组能量密度达到了170 Wh/kg,可以充电85 kWh,续航里程426 km。日本Panasonic推出的NCR18650B电池,重量仅48.5 g,能量密度243 Wh/kg。美国Sion Power公司研制的锂硫电池^[10]应用于无人飞机上,能量密度达到了380 Wh/kg。国内方面梅岭厂生产的锂离子电池能量密度为150 Wh/kg,与国外电池水平还存在一定差距。

作为电动泵的驱动源,直流无刷电机值得重视,这种电机具有高精度、高效率和高转矩的特点。目前,钕铁硼稀土电机^[11]的功率密度可以达到3 kW/kg以上,效率一般均在95%以上。如YASA电机公司生产的YASA-750电机额定功率90 kW,转速范围0~3.25 kr/m,电机的重量33 kg;YASA-400电机额定功率85 kW,转速范围0~7.5 kr/m,重量24 kg。国内浙江大学研制了功率等级为20 kW,转速范围在60~90 kr/m的系列高速永磁电机,重量均在10 kg以内。

基于现有电池、电机的水平,电动泵发动机已经具备可行性。新西兰火箭实验室(Rocket Lab)研发的“Electron”火箭的第一级由9个并联的Rutherford电动泵发动机组成。国内也开始了探索性研究。

本文根据国内现有电机和电池水平,给出一套电动泵发动机的系统方案,并通过质量性能评估,衡量其相对于燃气发生器循环系统的优势。

1 系统方案

图1为电动泵发动机系统示意图,系统包括推力室、离心泵、电机、控制器、电池、阀门等。其中燃料和氧化剂分两路,采用各自的电动泵,便于调节和控制。

电池采用三元锂电池,电压3.8 V,功率密度2 kW/kg,能量密度220 Wh/kg。通过先串联后并联的方式达到所需的能量供应需求。电机采用直流无刷稀土永磁高性能电机,功率约为24 kW,转速约

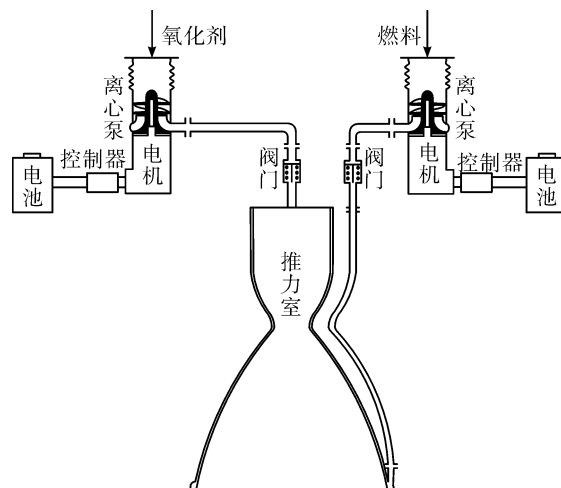


图1 电动泵发动机系统图

Fig. 1 System diagram for engine fed by electric pump

40 kr/m。电机控制采用双闭环控制,其中外环为速度环或者电压环,主要起稳定转速和抗负载扰动作用;内环为电流环或转矩环,主要作用是对电网电压的波动能够及时抗扰;电机在启动时,充分利用过载能力,保证获得允许的最大电流,提高系统响应速度;在位置调节过程中,使电流跟随其给定电流值的变化;当电机过载甚至于堵转时,限制电枢电流的最大值,从而起到快速的安全保护作用,电机控制系统如图2所示。

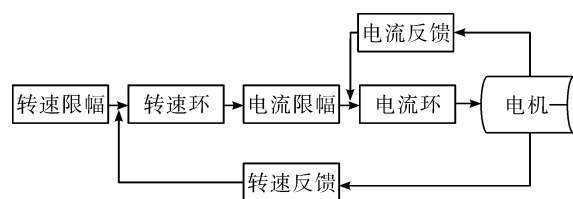


图2 高速电机控制系统

Fig. 2 Control system of high-speed motor

离心泵、气瓶、贮箱等组件沿用燃气发生器循环系统的成熟产品。推力室采用针栓喷注器,便于发动机工况调节。

2 性能评估与方案比较

电动泵发动机具有结构简单,便于工况调节的优势。与恒压挤压系统相比,电动泵发动机通过电动泵增压,供应系统压力需求较低,减少了增压气

瓶的质量,干重明显降低。与补燃循环系统相比,电动泵发动机由于受到电机、电池功率限制,难以达到高室压、大推力的要求,比冲性能有一定差距,但是系统复杂度明显降低。与燃气发生器循环系统相比,电动泵发动机减少了燃气发生器副系统,推进剂全部用来燃烧产生推力,具备较高的比冲性能,然而,电驱动模式带来了额外的电池质量,影响发动机系统干重。

本文编写了发动机质量评估程序,能够预估给定推力、混合比、室压条件下,发动机的比冲及系统各个组件的质量和消耗推进剂的质量。通过对燃气发生器循环系统与电动泵发动机系统的比较,寻找电动泵发动机的优势应用领域。

2.1 程序原理

图 3 列出了发动机质量评估的原理框图,具体过程是给定发动机设计推力、混合比和室压,通过 CEA 软件获得热力参数,从而计算发动机比冲和推进剂质量。运用质量计算公式获得电动泵发动机系统和燃气发生器系统各个组件的质量,最终得到两系统的总质量,比较在相同设计要求下不同系统的比冲和质量。

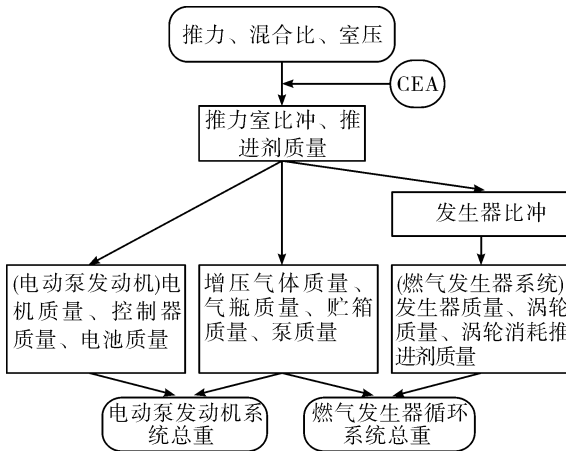


图 3 发动机质量评估程序原理框图

Fig. 3 Principle block diagram of evaluation program for engine mass

2.2 质量模型

公式(1)到公式(6)列出了发动机消耗推进剂质量的计算方法。

$$c^* = \frac{p_c^0 A_t}{\dot{m}} = \sqrt{R_{gc} T_c} / \left[\gamma_c \left(\frac{2}{\gamma_c + 1} \right)^{\frac{\gamma_c + 1}{\gamma_c - 1}} \right] \quad (1)$$

$$c_F = \frac{F}{p_c^0 A_t} = \sqrt{\frac{2\gamma_c^2}{\gamma_c - 1} \left(\frac{2}{\gamma_c + 1} \right)^{\frac{\gamma_c + 1}{\gamma_c - 1}} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{\gamma_c + 1}{\gamma_c - 1}} \right] + \frac{(p_e - p_a) A_e}{p_c A_t}} \quad (2)$$

$$\frac{A_t}{A_x} = \left(\frac{\gamma_c + 1}{2} \right)^{\frac{1}{\gamma_c - 1}} \left(\frac{p_x}{p_c} \right)^{\frac{1}{\gamma_c - 1}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_c + 1}{\gamma_c - 1} \left[1 - \left(\frac{p_x}{p_c} \right)^{\frac{\gamma_c + 1}{\gamma_c - 1}} \right]} \quad (3)$$

$$I_{sp} = c^* c_F \eta_I \quad (4)$$

$$\dot{m} = \frac{F}{I_{sp} \eta_c} \quad (5)$$

$$m_p = t_b \dot{m} \quad (6)$$

式中: p_c 为室压; p_c^0 为推力室滞止压力; p_e 为喷管出口压力; p_a 为大气压; p_x 为 x 位置压力; R_{gc} 为燃烧室气体常数; T_c 为燃烧室温度; A_e 为喷管出口面积; A_t 为喉部面积; A_x 为 x 位置面积; \dot{m} 为流量; γ_c 为燃烧室气体比热比; c^* 为特征速度; c_F 为推力系数; F 为设计高度下的推力; η_c 为燃烧效率; η_I 为比冲效率; t_b 为工作时间; m_p 为推进剂质量。

系统中各组件的质量采用如下公式进行计算。

$$m_{tp} = m_g + m_{tg} + m_{tu} + m_{pu} + m_{tu} + m_{gg} + m_{ptu} + m_{nozzle} \quad (7)$$

$$m_{ep} = m_g + m_{tg} + m_{tu} + m_{pu} + m_{ee} + m_{inv} + m_{bat} + m_{nozzle} \quad (8)$$

$$m_{total, tp} = m_{tp} + m_p \quad (9)$$

$$m_{total, ep} = m_{ep} + m_p \quad (10)$$

式中: m_{tp} 为燃气发生器循环系统干重; $m_{total, tp}$ 为燃气发生器循环系统总重; m_{ep} 为电动泵发动机系统干重; $m_{total, ep}$ 为电动泵发动机系统总重; m_g 为增压气体质量; m_{tg} 为气瓶质量; m_{tu} 为涡轮质量; m_{pu} 为泵质量; m_{gg} 为发生器质量; m_{ptu} 为涡轮消耗推进剂质量; m_{ee} 为电机质量; m_{inv} 为控制器质量; m_{bat} 为电池质量; m_{nozzle} 为推力室质量。

2.3 计算结果

首先针对地面发动机典型工况,采用液氧/煤油推进剂,推力 5 kN, 工作时间 200 s, 喷管出口压力 50 kPa 进行计算, 对比燃气发生器循环和电动泵发动机在不同室压下的总质量(图 4)。

从图 4 中可以看出, 在低室压条件下燃气发生器循环和电动泵发动机质量比较接近, 燃气发生器循环质量略轻, 随着室压增加, 电动泵发动机质量增速比燃气发生器循环小, 超过 6 MPa 以后电动泵发动机质量明显小于燃气发生器循环。由于燃气发生器循环和电动泵发动机的主要区别在于燃气发生器循环存在副系统, 而电动泵发动机存在电池, 下面着重从比冲和质量差异进行比较。

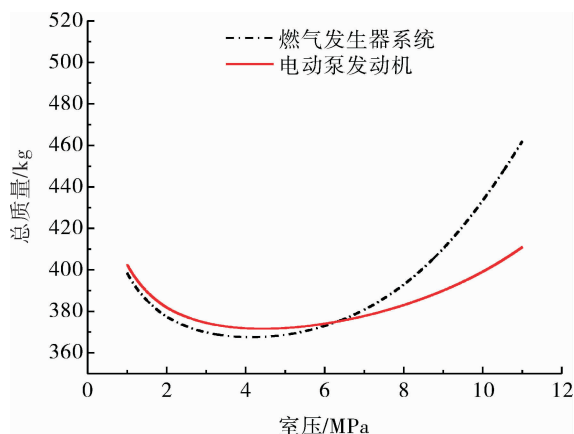


图4 推力5 kN,工作时间200 s系统总重与室压关系

Fig. 4 Relationship of total mass of system with combustion chamber pressure as thrust is 5 kN and working time is 200 s

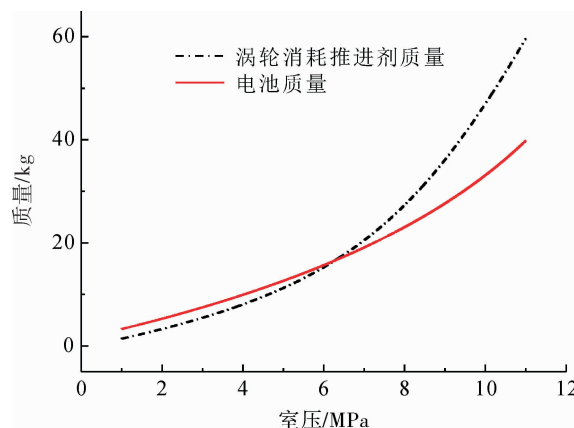


图6 推力5 kN,工作时间200 s涡轮消耗推进剂

质量和电池质量与室压关系

Fig. 6 Relationship of propellant mass consumed by the turbine and batteries mass with combustion chamber pressure as thrust is 5 kN and working time is 200 s

图5列出了燃气发生器循环和电动泵发动机地面比冲随室压的变化,从图中可以看出,随着室压的增加,电动泵发动机的地面比冲持续增加,而燃气发生器循环的比冲则先增加后降低。这是由于燃气发生器循环存在副系统,随着室压的增压,副系统消耗的推进剂质量增加导致发动机比冲降低。比冲的降低将导致推进剂的消耗量增加,系统的质量会有所增加。与此同时,室压增加时电动泵发动机电池的质量也会增加,应将副系统消耗的质量与电池的质量进行比较,衡量二者的差异(图6)。

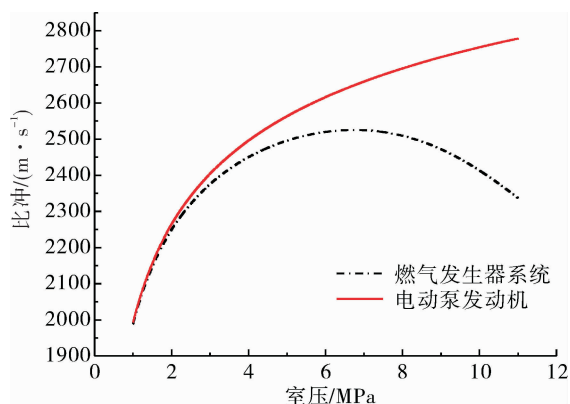


图5 推力5 kN,工作时间200 s地面比冲与室压关系

Fig. 5 Relationship of ground specific impulse with combustion chamber pressure as thrust is 5 kN and working time is 200 s

从图6可以看出,随着室压的增加,电动泵发动机电池增加的质量小于燃气发生器循环比冲降低导致的推进剂增量,所以高室压时电动泵发动机具有优势。然而,由于电动泵发动机中的电池质量变化与工作时间有较大的关系,因此进一步研究不同工作时间条件下燃气发生器循环与电动泵发动机的质量差异。

图7列出了推力5 kN,室压6 MPa时燃气发生器循环涡轮消耗推进剂质量和电动泵发动机电池质量随工作时间的变化关系。从图中可以看出,随着工作时间的延长,燃气发生器循环副系统消耗的推进剂质量逐渐增加,导致了系统总重的不断增加。电动泵发动机的电池质量在短时间工作时保持不变,300 s左右之后随着工作时间的延长而不断增加。这是由于衡量电池工作能力的指标有功率密度和能量密度两种。在短时间工作时,功率密度占主导,即要保证电池能够产生足够的功率,需要的初始质量偏大,而实际上结束工作时电池的能量并未完全用完。长时间工作时,能量密度占主导,即需要满足长时间工作需要的电量,电池质量随工作时间延长而增加。从图中可以看出,两条质量曲线在工作时间180 s左右有一个交点,涡轮副系统消耗的推进剂等于电池的重量。两系统的总重相同的工作时间与此时间略有差异,但表现出相同的规律,即短时间工作时燃气发生器循环具有质量优

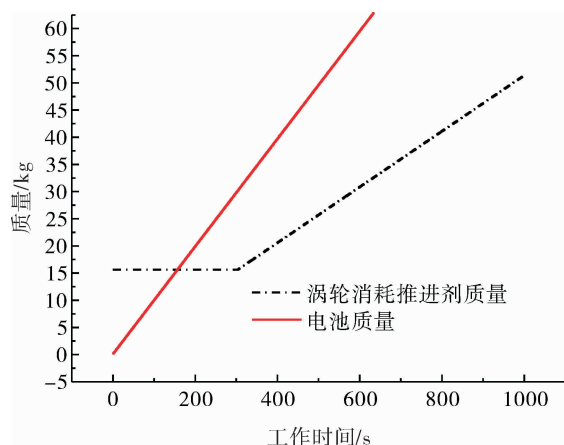


图7 推力5 kN,室压6 MPa 涡轮消耗推进剂
质量和电池质量与工作时间关系

Fig. 7 Relationship of propellant mass consumed by the turbine and batteries mass with working time as thrust is 5 kN and combustion chamber pressure is 6 MPa

势,长时间工作时电动泵发动机具有质量优势。

计算表明,两系统质量相同的工作时间点与燃烧室压有关,因此将不同室压下燃气发生器循环与电动泵发动机质量相等的时间点作为临界时间点列出,可以获得适合电动泵发动机的工作时间(表1)。

表1 不同室压下的临界时间点

Tab. 1 Critical time point at different pressures of combustion chamber

p_c/MPa	1	2	3	4	6	8	10
t_h/s	无	317	274	238	180	168	141

从表1中可以看出,当室压为1 MPa时,电动泵发动机始终比燃气发生器循环重,随着室压的增加,电动泵发动机具备质量优势的时间范围越宽。同时,只要室压大于等于2 MPa,工作时间大于317 s,电动泵系统始终是具备质量优势的。由此可见,电动泵发动机适合长时间工作的发动机。

3 结论

论证了电动泵发动机的系统方案,给出了系统组成及电池、电机及控制系统的方案。电动泵发动机方案中取消了燃气发生器循环中的发生器副系统,极大地降低了发动机设计难度,研制周期短,成

本低,有广泛的应用前景。结合发动机参数设计流程与质量预估模型,编制了发动机质量评估程序,针对不同工作条件下燃气发生器循环和电动泵发动机质量进行了计算。

计算结果表明:电动泵发动机在长时间工作条件下具备优势;不同室压条件下存在一个临界时间点,工作时间小于临界点时燃气发生器循环质量轻,工作时间大于临界点时电动泵发动机质量轻;室压大于等于2 MPa,工作时间大于317 s,电动泵发动机始终具备质量优势。因此,电动泵发动机适合长时间工作。

参考文献:

- [1] 谢光军,胡葛庆. 涡轮泵故障检测系统[J]. 推进技术, 2006,27(2):141-145.
- [2] 秦红强,王猛,杨亚龙,等. 液体火箭发动机三维数字化协同设计研究[J]. 火箭推进,2016,42(3):76-80.
QIN Hongqiang, WANG Meng, YANG Yalong, et al. Study on 3D digital collaborative design of liquid rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2016, 42(3): 76-80.
- [3] SCHNEIDER S J, VERES J P, HAH C, et al. Satellite propellant pump research: AIAA 2005-3560 [R]. Reston: AIAA, 2005.
- [4] MUNSHI M Z A. Handbook of solid state batteries and capacitors [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1995.
- [5] NAZRI G A, PISTOIA G. Lithium batteries [M]. New York: Springer, 2009.
- [6] GIERAS J F, WANG R J, KAMPER M J, Axial flux permanent magnet brushless machines [M]. Berlin: Springer, 2008.
- [7] 王峰,甘朝伦,袁翔云. 锂离子电池电解液产业化进展[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(1): 1-8.
- [8] 黄帅,张经纬,余来贵,等. 高能量密度锂离子电池负极材料研究进展[J]. 河南大学学报, 2016, 46(3): 300-305.
- [9] 冯力,沈晓彦,黄金健,等. 电动工具用锂离子电池正极材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(7): 537-543.
- [10] 杨武,杨汪,冯嘉妮,等. 锂硫电池电解质的研究进展[J]. 电池, 2016, 46(1): 52-55.
- [11] 胡文艳. 钕铁硼永磁材料的性能及研究进展[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 151-155.

(编辑:陈红霞)