

电动泵与挤压式推进系统对比研究

刘昌波

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 对电动泵和挤压式推进系统进行了对比研究, 主要考虑了气瓶、增压气体、贮箱、电池和电机等因素对推进系统的影响, 结果表明: 相对于传统的挤压式推进系统, 电动泵供应系统已经具有明显的优势, 而且能够获得更高的综合性能; 锂离子电池具有较大的能量密度和功率密度, 更适合应用于电动泵供应系统; 采用高性能永磁电机能够使得整个推进系统的质量更轻。在实际推进系统设计时, 应综合平衡发动机推力、燃烧室压力和工作时间等参数的影响, 才能有效地控制电池和电机的质量, 保证整个系统具有较高的综合性能。

关键词: 电动泵; 推进系统; 锂离子电池; 电机

中图分类号: V434-34 文献标识码: A 文章编号: 1672-9374 (2017) 02-0032-08

Comparative study on electric pump and pressure-fed propulsion systems

LIU Changbo

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The comparative study on the electric pump and pressure-fed propulsion systems are performed in this paper, in which the effects of gas vessel, compressed gas, tank, battery and electric motor are considered emphatically. The results show that the electric pump system is more advanced than the traditional pressure-fed system and can achieve higher general performance, the lithium ion battery is more suitable for the electric pump system due to its higher energy density and higher power density, and the high performance permanent magnet motor can make the electric pump-fed propulsion system lighter. In the actual design of propulsion system, only by comprehensive balance of engine thrust, chamber pressure and duration time parameters, can the researchers optimize the mass of the battery and the electric motor effectively and guarantee higher general performance of the whole system.

Keywords: electric pump; propulsion system; lithium ion battery; electric motor

收稿日期: 2016-06-26; 修回日期: 2016-11-20

作者简介: 刘昌波 (1979—), 男, 博士, 研究领域为液体火箭发动机推力室设计

0 引言

液体火箭常用的推进剂供应系统可以分为2种: 挤压式和泵压式系统。挤压式系统比较简单, 但需要高压气体/气瓶/贮箱, 故系统的结构质量较大, 一般适应于推力较小、总冲需求较低的推进系统。泵压式推进系统的结构质量相对较小, 但发动机需要复杂的涡轮泵系统, 研制成本高、周期长, 一般适应于推力较大、总冲需求较高的推进系统。随着电池和电机技术的进步, 小推力、低总冲需求的推进系统采用电动泵供应推进剂已经成为可能。如, 最近 Rocket Lab 公司提出了全电动泵供应系统的小型火箭 Electron 方案。

采用大推力液体火箭发动机的推进系统, 推进剂增压往往需要很高的功率。如某助推发动机, 地面推力约 750 kN, 两泵需要提供约 3.6 MW 功率输入才能保证系统的功率平衡。按照目前的钕铁硼永磁电机能够达到约 3 kW/kg 功率密度来计算, 即使假设电机的效率为 1.0, 所需电机的质量也有约 1.2 t, 如果再加上电池的重量, 则整个推进系统将太过于笨重而没有实用性。因此, 电动泵供应系统比较适合于较小功率需求的推进系统, 这就与挤压式系统形成了直接竞争关系^[1], 对较小推力、较低总冲需求的泵压式推进系统也有很好的适应性。对电动泵推进系统, 本文将结合同等推力量级的挤压式系统进行对比分析。

不管挤压式系统, 还是电动泵系统, 都包含气瓶、贮箱、推力室、各种阀门、总装管路等结构组件以及增压气体和推进剂。进一步分析发现, 相同应用条件下, 2种系统存在较大差别的主要是气瓶、贮箱、增压气体量和推进剂量, 下面的分析将不考虑各种阀门、总装组件和推力室的质量, 即认为2种推进系统的这些组件的质量相同。因此各方案的系统质量要比实际值偏小, 但这并不影响对比分析的结论。下面重点对各方案进行对比分析, 揭示不同方案和因素对推进系统的影响规律。

1 推进系统总体参数

要对整个推进系统进行对比分析, 需要首先确定与发动机相关的性能参数。一般情况下, 根据任务需求, 可以确定所需推进剂组合、混合比、发动机推力、比冲和工作时间等参数, 这样就可以对其他参数进行计算。如, 氧化剂流量:

$$q_{mo} = \frac{r}{1+r} \frac{F_v}{I_v} \quad (1)$$

燃料流量:

$$q_{mf} = \frac{1}{1+r} \frac{F_v}{I_v} \quad (2)$$

氧化剂总质量:

$$m_o = q_{mo} t$$

贮箱的总体积:

$$V_o = m_o / (\eta_t (1 - \eta_b) \rho_o)$$

燃料的总质量:

$$m_f = q_{mf} t$$

贮箱总体积:

$$V_f = m_f / (\eta_t (1 - \eta_b) \rho_f)$$

式中: r 为混合比; F_v 为发动机推力; I_v 为比冲; t 为工作时间; η_t 为贮箱排空率, 一般取 0.99; η_b 为气垫占贮箱的容积比, 根据经验取 2.5%; ρ_o 为氧化剂的密度; ρ_f 为燃料的密度。

虽然永磁电机的功率密度已经得到了很大的提高, 但相对于液体火箭发动机的功率需求而言仍然偏小, 故在氧化剂路和燃料路各设置一台电机。这样有如下好处:

1) 可以根据各泵的比转速设计效率最优的泵, 根据经验可以取泵的效率 $\eta_p = 0.68$, 有利于提高整个电动泵系统的效率;

2) 与整个系统采用单电机的方案相比, 可以降低单台电机的质量, 从而降低电机的设计难度。

根据推进剂流量和功率需求可以求得各泵的功率, 氧化剂泵的功率:

$$P_o = \frac{q_{mo} \Delta p_o}{\eta_p \rho_o}$$

燃料泵的功率:

$$P_i = \frac{q_{mf} \Delta p_i}{\eta_p \rho_f}$$

式中: Δp_o 为氧化剂泵出入口之间的压差; Δp_i 为燃料泵出入口之间的压差。

2 气瓶及增压气体参数

不管挤压式系统, 还是电动泵系统, 都需要气瓶和增压气体, 但需求量差别很大。气瓶参数主要参考 GB 150-1998 《钢制压力容器》来计算。假设初始状态贮箱气垫温度与气瓶温度相同, 气体在给贮箱充气过程中发生多变过程, 则所需气瓶的体积可以按式 (3) 计算, 这里不考虑耗气量, 如减压阀工作时可能会发生气体泄出、电动气阀耗气等:

$$V_g = \frac{(p_i V_i / C_2 - p_u V_u) C_1}{C_1 p_{g0} - p_{g1}} \quad (3)$$

其中

$$C_1 = (p_{g1} / p_{g0})^{\frac{n-1}{n}}$$

$$C_2 = (1 - p_{g1} / p_{g0}) / \left(n \left(1 - (p_{g1} / p_{g0})^{\frac{1}{n}} \right) \right)$$

式中: C_1 和 C_2 为常数; p_{g0} 为气瓶初始压力; p_{g1} 为气瓶充气结束时的压力; p_i 和 V_i 分别为贮箱的压力和容积; p_u 和 V_u 分别为气垫的压力和容积; n 为气体的多变指数。假设气瓶为球形, 则气瓶的直径为: $d = \sqrt[3]{6V_g / \pi}$, 则气瓶壁厚:

$$\delta = p_{g0} d / (4\sigma_b \phi / n_b - p_{g0}) + C \quad (4)$$

气瓶质量:

$$m_{ig} = n_g \pi d^2 \delta \rho$$

式中: σ_b 为材料的屈服应力; ϕ 为焊缝因子, 一般取 1.0; n_g 为形状因子, 一般取 1.2。调整常数 C 与材料的加工方法等因素相关, 作为估算可以取 $C=0.15\delta$,

假设气瓶气体为理想气体, 则充气质量估算可以采用式:

$$m_g = p_{g0} V_g / (R_g T)$$

式中: R_g 为气体常数; T 为气体温度。

3 贮箱参数

挤压式系统一般采用高压贮箱, 而电动泵系统的贮箱压力一般很低, 因此 2 种推进系统的贮箱结构质量差别也很大。在进行贮箱参数计算之前, 作以下假设:

1) 当贮箱容积小于 0.523 m^3 (直径 d 约 1.0 m) 时, 采用单个球形贮箱; 当贮箱容积大于 0.523 m^3 且小于 1.046 m^3 时, 采用 2 个球形贮箱, 此时每个球形贮箱的直径均小于 1.0 m ; 如果贮箱容积大于 1.046 m^3 时, 增加内径为 1.0 m 的圆柱段, 两端采用内径 1.0 m 的半球, 通过调整圆柱段的高度来调节贮箱容积。

2) 贮箱的安全系数取 2.0, 贮箱壁厚计算公式选取 GB 150-1998 《钢制压力容器》中的内压圆筒壁厚计算公式。

球形贮箱壁厚的计算公式:

$$\delta = \frac{p_i d}{2\sigma_b \phi / n_b - p_i} + C \quad (5)$$

式中: p_i 为贮箱压力; ϕ 为焊缝系数, 计算时全部假设为 1.0; 附加厚度取 $C=0.5 \text{ mm}$ 。贮箱质量:

$$m_{i0} = n_g \pi d^2 \delta \rho \quad (6)$$

圆柱形贮箱的壁厚:

$$\delta = \frac{p_i d}{4\sigma_b \phi / n_b - p_i} + C \quad (7)$$

2 个封头即为一个圆球, 其质量也可以按式 (6) 进行估计。圆柱段质量:

$$m_{i1} = \pi d^2 h \delta \rho$$

式中 h 为圆柱段的高度, 可以根据假设 1) 计算。

4 电池和电机性能

如果采用电动泵, 还需要原始电能来驱动。提供电能的常用装置有超级电容和电池。目前, 超级电容的能量密度太小, 主流电容器的能量密度均小于 $10 \text{ Wh/kg}^{[2]}$, 比较有希望提高能量密度的石墨烯和陶瓷基超级电容还处于实验室状态^[3]。因此本文将重点研究以电池作为驱动电源的方案。

几种常用的电池如表 1 所示^[2,5,13-14]。铅酸电池和镍隔电池的技术很成熟, 但实际比能量太低; 如果推进剂采用氢/氧 (或能够构成燃料电池的甲醇/氧等) 组合, 可以考虑采用燃料电池的方案, 这样燃料电池可以采用与主动力相同的推进剂组合, 整个推进系统将得到简化, 但不作为本文的研究重点。

表 1 几种常见电池的性能

Tab. 1 Performances of several common batteries

电池种类	电压/V	比能量/ (Wh/kg)	实际比能 量/(Wh/kg)
铅酸电池	2.1	252.0	~45
镍隔电池	1.35	244.3	~60
锂亚硫酰氯电池	3.65	1 470	~500
锂离子电池	3.8	418	~250
锂硫电池	2.29	2 600	~350
氢氧燃料电池	1.23	3 659.2	~100

本研究将重点考虑采用锂电池作为驱动电源的方案。锂亚硫酰氯电池属于一次电池, 已经在水下无人运载器上获得应用^[4-5], 尽管该电池的能量密度能够达到约 500 Wh/kg, 但其功率密度相对较低^[6], 大功率放电时能量密度降为约 140 W/kg, 不适合作为电动泵系统的电源。根据锂离子电池使用的材料不同又可以分为钴酸锂、磷酸铁锂、锰酸锂及三元锂等^[7], 其中三元锂电池的研究成果最值得关注^[8-9]。如, 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, 电池组达到了 170 Wh/kg, 可以充电 85 kWh, 续航里程 426 km。经过努力, 日本 Panasonic 又推出了 NCR18650B 电池, 标称容量 3 350 mAh, 重量仅 48.5 g, 容积密度 676 Wh/L, 能量密度 243 Wh/kg, 这代表了目前锂离子电池批产的最高应用水平。此外, 锂硫电池的研究成果也非常值得关注^[10-11], 实验室中已经获得的能量密度超过了 1 kWh/kg。美国

Sion Power 公司研制的锂硫电池应用于无人飞机上, 白天依靠太阳能充电, 晚上依靠锂硫电池放电, 连续飞行了 14 天。该锂硫电池的能量密度达到了 350~380 Wh/kg^[12], 循环次数达到了 1 000 次。综合分析, 电动泵系统将重点研究采用高比能的三元锂电池和锂硫电池作为电源的方案。

电池的质量按照能量密度和功率密度来计算:

$$m_e = \max \left[\frac{P}{\delta_p}, \frac{E}{\delta_E} \right] \quad (8)$$

式中: P 为功率需求; E 为总能量需求; δ_p 和 δ_E 分别为电池的功率密度和能量密度。

传统电机采用线圈励磁, 结构笨重。随着永磁材料的不断发展, 特别是钕铁硼稀土永磁材料的进步^[15-17], 电机的结构质量得到明显的降低。如 10 kW 电机, 采用线圈励磁时重量约为 220 kg, 而换成稀土永磁材料后重量仅为 92 kg^[17], 重量减轻 54.2%。随着研究的深入, 稀土永磁材料的性能也在不断提高。如, 北京大学应用磁学中心^[16]开发的稀土铁氮磁粉最大磁能积达到快淬钕铁硼磁粉的至少 2 倍以上。稀土永磁材料性能及设计手段的提高将会进一步减轻电机的结构质量。目前, 钕铁硼稀土电机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-250 电机, 额定功率 65 kW, 电机的重量只有 18 kg, 功率密度为 3.6 kW/kg; YASA-400 电机, 额定功率 85 kW, 重量 24 kg, 功率密度 3.5 kW/kg。作为电动泵的驱动源, 直流无刷电机值得重视^[18], 这种电机具有高精度、高效率和高转矩的特点, 适合应用于电动泵系统。

推进系统为了获得高性能, 减轻整个系统的质量, 电源重点考虑三元锂离子电池和锂硫电池, 电机采用直流无刷稀土永磁高性能电机。

5 计算结果

小推力、低总冲系统主要应用于空间推进系统, 这里选择典型的案例, 来研究电动泵系统在航天推进领域的应用。推进剂组合选择常用的 N_2O_4/MMH , 为了获得较高的性能, 发动机混合

比取 2.0, 发动机的比冲取 3 140 m/s (320 s)。目前, 常用的气瓶压力为 20~35 MPa, 研究时均取 30 MPa, 材料选择常用的高强度钛合金 (TC-4), 屈服强度 σ_s 为 870 MPa (见 GB 6613-86 《重要用途的 TC4 钛合金板材》)。增压气体选择增压能力较好的氦气^[19]。挤压式系统贮箱最低压力取 2.0 MPa, 材料采用钛合金 (TC-4)。电动泵系统的贮箱压力选择为 0.4 MPa, 由于压力较低, 因此选择更轻质的铝合金材料, 常用于贮箱制造的为铝合金 2219。锂离子电池组的能量密度选择 220 Wh/kg, 功率密度选择 2 kW/kg; 锂硫电池组的能量密度选择 350 Wh/kg, 功率密度选择 1.2 kW/kg, 电池能量的余量系数均取为 1.2。电机的功率密度选择为 3 kW/kg。泵的功率密度一般较大, 如某 50 kN 高空发动机氧化剂泵约 23 kW/kg, 燃料泵约 15 kW/kg, 计算时均取 20 kW/kg, 效率均取 0.68。下面对各方案进行对比分析。

为了对不同的系统方案进行比较, 引入参数: 结构与推进剂的质量比 m_s/m_p , 表示要贮存 m_p 推进剂所需要的结构质量分数, 是评价推进系统性能的一个综合指标, m_s/m_p 的值越小, 表明推进系统的综合性能越高。下面, 首先采用典型的应用案例, 对电动泵系统与挤压式系统进行对比分析。再对影响推进系统质量比的重要参数, 如电池性能、电机性能、发动机推力、燃烧室压力及工作时间等参数的影响进行深入的对比分析。

5.1 挤压式和电动泵推进系统对比

m_s/m_p 与燃烧室压力、推进系统工作时间和发动机推力的关系如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 随着发动机推力增大, 推进剂流量将增大, 相同工作时间内消耗的推进剂总量增大, 而推进系统的结构质量增加相对较慢, 因此图 1 中 4 种情况的 m_s/m_p 均随之减小。当发动机推力小于某一值 (图 1 中为 20 kN) 时, 由于推进剂的消耗量相对较少, 每种推进剂均采用单个球形贮箱, 或 2 个球形贮箱, 即贮箱方案变化很大, 而导致 m_s/m_p 变化范围较大。还可以看出, 当推进剂消耗量较少时, 推进系统的结构质量所占的比

重均较大。如当发动机推力 1 kN, 燃烧室压力 1 MPa, 工作时间为 500 s 时, 推进剂总消耗量只有约 159 kg, 挤压式系统的结构质量至少要 23 kg 以上, m_s/m_p 约为 0.147。当推进剂消耗量较大时, 采用两个圆柱形贮箱, m_s/m_p 变化趋势将变得平缓。

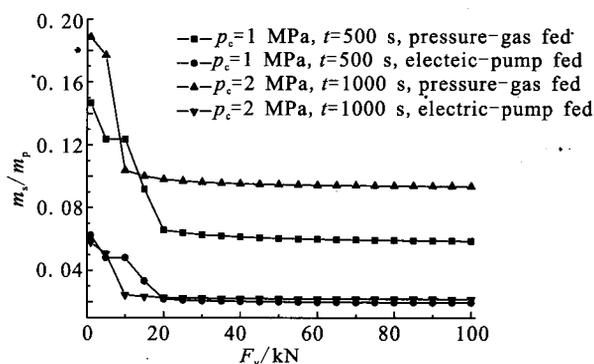


图 1 m_s/m_p 与推力的关系

Fig. 1 Relationship between m_s/m_p and F_e

从图 1 还可以看出, 当燃烧室压力、工作时间和发动机推力均相同时, 挤压式系统与推进剂的质量比明显高于电动泵系统与推进剂的质量比, 这说明此时电动泵系统较挤压式系统具有明显的优势。如当燃烧室压力为 1 MPa, 工作时间为 500 s, 发动机推力 40 kN 时, 挤压式系统的 m_s/m_p 约为 0.06, 而电动泵系统的 m_s/m_p 只有约为 0.02。而且, 进一步提高燃烧室压力, 则挤压式系统较电动泵系统的质量增加更快。如当燃烧室压力增大到 2 MPa, 工作时间为 1 000 s, 发动机推力 40 kN 时, 挤压式系统的 m_s/m_p 达到了约 0.10。此时, 需消耗推进剂约 12.7 t, 则整个推进系统的质量约为 1.27 t, 而电动泵系统的结构质量只有 254 kg。这说明, 电动泵系统能够适应更高的燃烧室压力, 从而可以进一步减小推力室质量, 或者相同结构质量下能够获得更高的发动机比冲性能。

可以看出, 随着电机和电池技术的进步, 对推力较小、总冲需求较低的推进系统, 采用电动泵供应比传统的挤压式系统已经具有明显的优势。而且, 采用电动泵系统允许采用更高的燃烧室压力, 这样还能够获得更高的综合性能。

5.2 电动泵系统的影响因素分析

5.2.1 电池类型

为了研究不同电池类型对推进系统的影响, 图 2 给出了燃烧室压力 1.0 MPa, 工作时间 500 s 时, m_e/m_p 与推力变化的关系。从图 2 中可看出, 采用锂硫电池推进系统质量要更大一些, 说明电动泵系统主要是功率型需求, 即电池功率密度对整个推进系统影响更大。如果能量密度很大而提供的功率密度较小是不适合用于电动泵推进系统。但如果工作时间较长, 能量需求将会显著增大, 此时能量密度可能会成为电池质量的控制参数。由于锂离子电池技术更成熟, 故下面重点对锂离子电池应用于电动泵系统的情况进行分析。

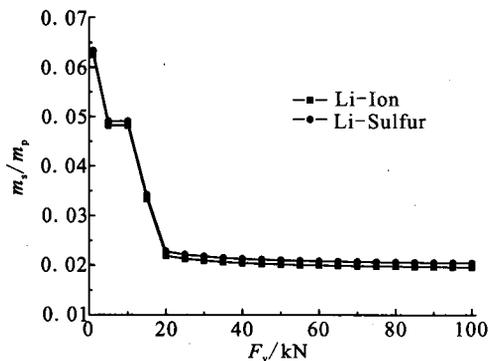


图 2 $p_c=1$ MPa, $t=500$ s 时, m_e/m_p 与推力的关系

Fig. 2 Relationship between m_e/m_p and F_e as $p_c=1$ MPa and $t=500$ s

对采用锂离子电池的推进系统, 电池和电机与推进剂的质量比如图 3 所示。

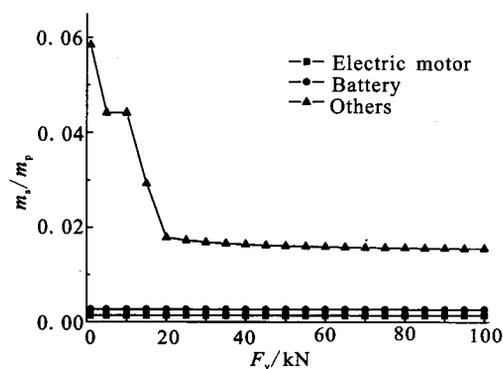


图 3 不同组件的 m_e/m_p 与推力的关系 ($p_c=1$ MPa, $t=500$ s)

Fig. 3 Relationship between m_e/m_p of different components and F_e as $p_c=1$ MPa and $t=500$ s

从图 3 中可以看出, 由于电机的功率密度较大, 故其质量较小, m_e/m_p 也随之较小; 电池的功率密度偏小, 则其质量就稍大一些; 由于其他结构受贮箱的影响较大, 当贮箱由单个球形变成 2 个球形, 再到 2 个圆柱形时, 其质量迅速减小, 最后变成 2 个圆柱形贮箱后, 变化趋势变缓。随着发动机推力的增大, 泵所需功率正比增加, 故电池和电机质量均正比增加; 同时推进剂消耗量也在正比增加, 故电池和电机与推进剂的质量比例保持不变。

5.2.2 燃烧室压力、工作时间和发动机推力

图 4 给出了不同燃烧室压力、工作时间和发动机推力对 m_e/m_p 的影响关系。从图 4 中可以看出, 仅当推力增大时, m_e/m_p 开始减小较快, 随后基本保持不变。这说明, 当发动机推力较小时增大推力, 推进剂消耗量会大幅度增加, 但整个推进系统结构质量增加较慢; 而当发动机推力较大时增大发动机推力, 推进系统的结构质量将按几乎固定的比例增大。当仅提高燃烧室压力时, 推进系统所需的功率提高, 因此电池和电机的质量均会增加, 从而整个推进系统的结构质量也会迅速增加。如当发动机推力 20 kN, 工作时间 500 s 时, 当燃烧室压力由 1.0 MPa 提高到 2.0 MPa 时, m_e/m_p 由 0.022 提高到 0.026。图 5 给出了推力 5 kN/10 kN, 工作时间 1 000 s 情况下, m_e/m_p 随燃烧室压力的变化曲线。可以看出, 当燃烧室压力增大时, m_e/m_p 的增大幅度越来越大, 由于采用了电动泵系统, 故对一种推力量级的推进系统, 气瓶、增压气体和贮箱等结构质量是不变的, 只有电池和电机出现了大幅度增长。这也说明, 功率需求的增加会显著增加电池和电机的质量, 从而增加推进系统的结构质量。仅增大工作时间, 电机的质量不会改变, 但由于驱动泵所需的能量不断增加, 因此电池的质量会随之增加, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 随着燃烧室压力、工作时间和推力的增大, 电池的质量均会增大。而推进剂消耗量随时间的增长更快, 因此 m_e/m_p 仍然随着时间的增大而减小, 如图 7 所示。

发动机推力或燃烧室压力提高, 所需功率均增大, 电池和电机的质量均相应增加; 工作时间

加长,仅影响推进系统的能量需求,只有电池的质量会随之增大。从减小整个推进系统的结构质量来看,电动泵系统比较适应于推力不太大、燃烧室压力不太高和工作时间不太长的任务。

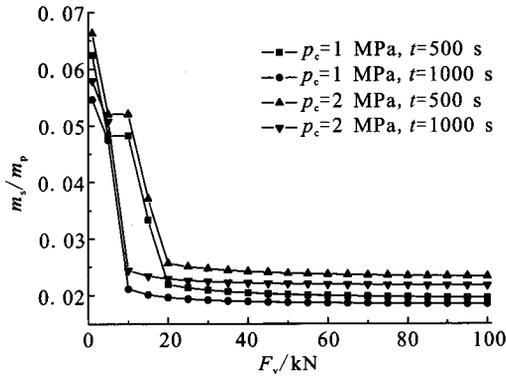


图4 m_e/m_p 与 $p_c/t/F_v$ 的关系
Fig. 4 m_e/m_p versus $p_c/t/F_v$

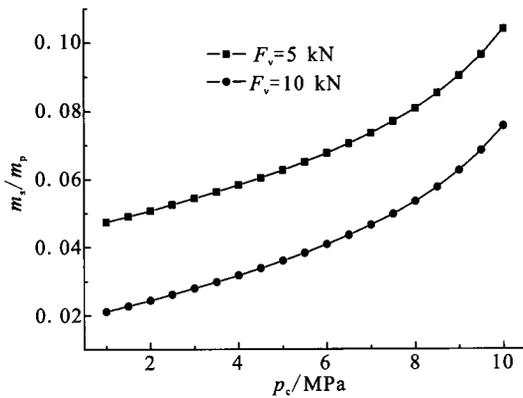


图5 $F_v=5$ kN/10 kN, $t=1000$ s, m_e/m_p 与室压关系
Fig. 5 m_e/m_p vs p_c as $F_v=5$ kN/10 kN and $t=1000$ s

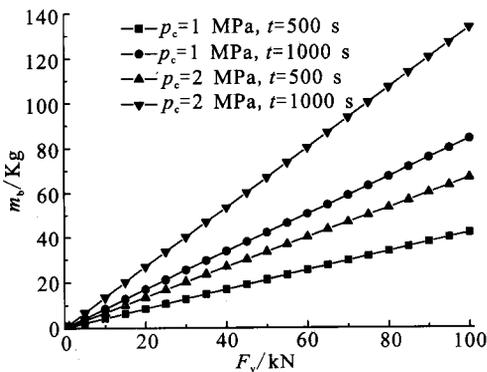


图6 电池质量与 $p_c/t/F_v$ 的关系
Fig. 6 Relationship between battery mass and $p_c/t/F_v$

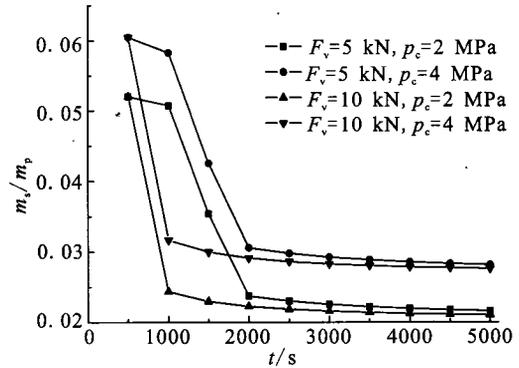


图7 m_e/m_p 与时间的关系
Fig. 7 m_e/m_p versus t

6 结论

通过对挤压式与电动泵推进系统进行对比分析可以得到如下结论:

- 1) 相同应用情况下,电动泵系统较挤压式推进系统具有明显的优势,而且可以采用更高的燃烧室压力,能够获得更高的发动机性能。
- 2) 目前,锂离子电池具有较高的能量密度和功率密度,技术成熟,比较适合应用于电动泵推进系统;高性能永磁电机是电动泵系统的良好选择。
- 3) 电机质量主要受发动机推力和燃烧室压力的影响;而电池质量则主要受发动机推力、燃烧室压力和工作时间的综合影响,推进系统设计时应综合考虑这些因素的影响。

参考文献:

- [1] SOLDA N, LENTINI D. Opportunities for a liquid rocket feed system based on electric pumps [J]. Journal of propulsion and power, 2008, 24(6): 1340-1346.
- [2] 何东林, 杨传仁, 秦登静, 等. 高能量密度储电材料研究现状[J]. 物联网技术, 2011, 1(10): 49-55.
- [3] 杨德志, 沈佳妮, 杨晓伟, 等. 石墨烯基超级电容器研究进展[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(1): 1-8.
- [4] 蔡年生. UUV 动力电池现状及发展趋势[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(2): 81-87.
- [5] 龚锋, 王力. UUV 用动力电池综述[J]. 船电技术, 2013, 33(8): 16-20.

- [6] 黎红, 杨林億. 锂 / 亚硫酸氯电池的发展现状[J]. 船电技术, 2009, 29(8): 57-60.
- [7] 康文政, 李文成. 电动自行车用锂电池 [J]. 中国自行车, 2013, 26(10): 78-80.
- [8] 崔妍, 江卫军, 张溪, 等. 三元锂电池将成为后起之秀[J]. 中国金属通报, 2013, 20(28): 30-31.
- [9] 游保平. 动力锂电池困局[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 652-654.
- [10] 墨柯. 下一代二次锂电池发展趋势及展望[J]. 新材料产业, 2013(10): 4-8.
- [11] 刘云霞, 詹晖. 锂硫电池性能改进的研究进展[J]. 电池, 2013, 43(5): 296-299.
- [12] 李伟, 姚岑, 吴兴隆, 等. 高比能锂-硫电池研究进展[J]. 分子科学学报, 2013, 29(6): 448-460.
- [13] 刘春娜. 锂硫电池研发动态 [J]. 电源技术, 2013, 37(7): 1105-1106.
- [14] 索鏊敏, 胡勇胜, 李泓, 等. 高比能锂硫二次电池研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(31): 3172-3188.
- [15] 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.
- [16] 杨金波, 韩景智, 刘顺荃, 等. 新型永磁材料的研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43 (10): 1188-1205.
- [17] 朱俊. 稀土永磁电机的应用现状及其发展趋势[J]. 中国重型装备, 2008, 24(4): 38-42.
- [18] 肖军. 解读直流无刷永磁电机[J]. 电气工程应用, 2012, 27(4): 23-29.
- [19] 范瑞祥, 田玉蓉, 黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 9-16.
- FAN Ruixiang, TIAN Yurong, HUANG Bing. Study on pressurization of new generation launch vehicle [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(4): 9-16.

(编辑: 马 杰)

(上接第 31 页)

- [5] 何博, 肖强, 聂万胜, 等. 燃烧室高压环境下喷雾液滴非稳态蒸发数值研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(4): 55-60.
- [6] HIROYASU H, KADOTA T, SENDA T, et al. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures: part1, experimental study[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers, 1974, 40(339): 3147-3154.
- [7] GHASSEMI H, BAEK S W, KHAN Q S. Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures[J]. Combustion science & technology, 2006, 9(178): 1669-1684.
- [8] 苏凌宇. 负压环境下燃料液滴蒸发过程的试验和理论研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [9] 马力, 仇性启, 王健, 等. 单液滴蒸发影响因素实验研究[J]. 石油化工, 2013, 33(1): 103-106.
- [10] 马小康, 张付军, 韩恺, 等. 柴油、正丁醇及其混合燃料单液滴蒸发特性的试验[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 48-52.
- [11] YANG J R, WONG S C. An experimental and theoretical study of the effects of heat conduction through the support fiber on the evaporation of a droplet in a weakly convective flow [J]. Ineternation journal of heat & mass transfer, 2002, 45(23): 4589-4598.

(编辑: 马 杰)