http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0622

电动静液作动器热力学建模方法及油液温升规律

王岩[1,*], 郭生荣[2], 杨乐[2]

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100083;
2. 航空工业金城南京机电液压工程研究中心, 南京 211106)

摘 要: 电动静液作动器(EHA)是多电飞机关键子系统之一,其高度集成设计在减小体积和质量的同时,大幅降低换热能力,导致 EHA 油液温度过高、功能丧失。针对目前 EHA 一维热力学建模不足问题,以油冷电机驱动的 EHA 为研究对象,提出 EHA 的"三维+一维+三维"的热力学建模方法。首先,分析 EHA 能量转换及传递规律,探究 EHA 热能产生和扩散途径,在考虑参数时变基础上提出 EHA 的"三维+一维+三维"热力学建模方法;其次,基于 ANSYS 平台建立 EHA 电机生热和壳体对流换热的三维热力学模型;然后,建立柱塞泵、液压缸、阀和增压油箱等一维热力学模型;最后,在 AMESim 平台上搭建 EHA 的"三维+一维+三维"的热力学模型。仿真和实验验证了 EHA 的"三维+一维+三维"热力学建模方法的正确性,揭示了 EHA 油液温升规律,为 EHA 的热设计提供了理论依据。

关 键 词: 电动静液作动器(EHA); 热力学建模方法; 电机; 温升规律; 柱塞泵
中图分类号: V245.1
文献标识码: A **文章编号**: 1001-5965(2018)08-1596-07

机载电动静液作动器(Electro-Hydrostatic Actuator, EHA)是多电飞机关键子系统之一,在民用飞机(如 A380、B777)和军用飞机(如 C-130、F-35)上得到了应用,减轻了飞机质量(空客 A380 采用 EHA 减重 450 kg),提高了安全性[1]。

EHA 由电机、液压泵、阀、蓄能器、作动器和控制器等组成,将电能根据飞行指令转换为作动器的机械能操纵飞行舵面,在能量传递和转换过程中发生功率损失,产生热量。产生的热量一部分通过壳体散逸到周围环境,另一部分滞留在 EHA 较小密闭容腔内,散热面积小、散热能力差,导致液压油温度过高、功能丧失,危及飞行安全,因此油液温度过高已成为 EHA 装机应用前亟待解决的问题[2]。

热力学与工程传热学是液压系统热分析的主要理论基础,热力学第一定律从能量守恒的角度阐述了热量的转换和传递,热力学第二定律表明了热量传递的方向性。目前,液压系统热力学研究可分为 3 类:①根据热力学第一定律和第二定律,将液压元件或系统划分为一个或几个温度节点建立热力学模型[3-7];②利用预测[8]、神经元网络等研究液压系统油液温度变化;③液压系统商业软件,如 EASY5、DSHplus、AMESim[9] 和 Dymola[10] 等。

针对 EHA 热力学研究,美国 NASA[11] 通过飞行试验研究了油液温度对 EHA 性能的影响;欧洲空中客车[11] 通过飞行试验和理论分析相结合的方法研究了 EHA 油液温度的控制,目前中国尚不具备 EHA 飞行试验条件;Andersson 等[12] 根据热力学第一定律,考虑油液参数时变性,建立了工作

收稿日期: 2017-10-10; **录用日期**: 2017-11-23; **网络出版时间**: 2017-12-20 09:11
网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20171219.1632.007.html
基金项目: 国家自然科学基金 (51375029, 51775013)
* **通信作者**. E-mail: wybuaa@buaa.edu.cn

引用格式: *王岩, 郭生荣, 杨乐. 电动静液作动器热力学建模方法及油液温升规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1596-1602. WANG Y, GUO S R, YANG L. A thermodynamic modeling method of electro-hydrostatic actuator and law of oil temperature rise[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1596-1602 (in Chinese).*

压力为 14 MPa 的 EHA 一维热力学模型,但没有考虑电机发热等,仿真表明在极端飞行情况下 EHA 油液温度过高;Johansson 等[13]根据热力学第一定律,使用 HOPSAN 软件,建立了 EHA 一维热力学模型,仿真表明在极端飞行情况下 EHA 油液温度过高;Engelhardt[14]基于 MATLAB 平台,根据热力学第一定律,建立了电液功率单元的一维热力学模型;Takebayashi 和 Hara[2]采用键合图理论分析流体传热、有限元计算壳体热传导方法,建立工作压力为 14 MPa 的 EHA 热力学模型;Stadlbauer[4]和 Li[15]等采用集总参数热网络建立了 EHA 热力学模型,计算温度最高点。目前,EHA 热力学研究主要存在 3 点不足:①采用一维热力学建模方法,忽略了 EHA 复杂结构对散热的影响;②忽略了电机生热对 EHA 油液温度的影响;③未充分考虑 EHA 热参数的时变特性。

针对 EHA 传统热力学研究不足问题,以伺服电机-定量泵的 EHA 为对象,研究跨能域(电能、机械能、液压能、热能)、变参数(电机电阻、液压油密度、黏度)EHA的热能产生与散逸规律,提出了 EHA 的“三维 + 一维 + 三维”的热力学建模方法,其中基于 ANSYS 平台建立 EHA 电机三维热力学模型,基于流体力学和工程热力学建立柱塞泵、液压缸、阀和增压油箱等的一维热力学模型,基于 ANSYS 平台建立 EHA 壳体的三维对流换热模型,仿真揭示了 EHA 油液温升的规律,为 EHA 的热控制奠定了基础。

1　EHA 的“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法

采用伺服电机-定量泵结构的 EHA 原理如图 1所示。伺服电机拖动双向定量泵,将电能转换为液压能驱动作动筒,通过调节电机转速实现作动筒位移的闭环控制。EHA 油液外部泄漏通过蓄能器补充,电机通过柱塞泵泄漏油冷却。

EHA 将电能转换为机械能驱动舵面,能量转换及流动途径如图 2 所示。

由图 2 可知,在能量转换过程中,由于存在控制器功率转换损失、电机导电损失、电机铁心涡流损失、液压元件的摩擦、泄漏和节流损失等,损失

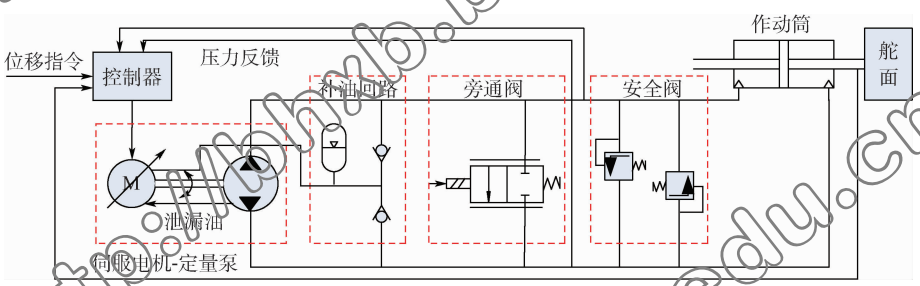

图 1　EHA 原理

Fig. 1　Principle of EHA

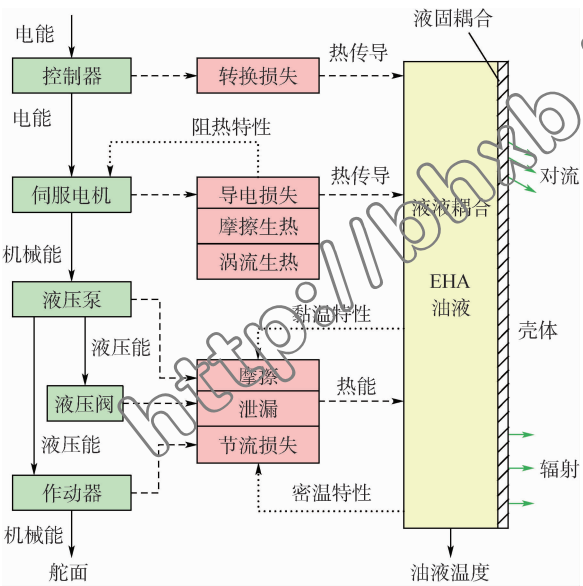

图 2　EHA 能量传递及转换过程

Fig. 2　Energy transfer and transformation process in EHA

功率转换为热能,直接或间接进入油液。EHA 热力学建模难点主要体现在以下几点:①EHA 是跨能域系统,包括电能、机械能、液压能和热能等;②电机生热机理复杂,包括线圈电阻生热、铁心涡流生热、转子与油液摩擦生热等;③EHA 的壳体形状复杂,不同部位散热能力不同。

针对 EHA 建模难点和特点,考虑电机的阻热特性、油液的黏温特性和密温特性,以及传热过程的液液耦合和液固耦合,提出 EHA 的“三维 + 一维 + 三维”的热力学建模方法,如图 3 所示。图中:U_{ci}为控制器输入电压;U_{mi}为电机输入电压;M为电机输出转矩;ω为电机转速。

由图 3 可知,采用“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法时,基于 ANSYS 计算电机的三维生热、基于工程热力学等理论计算柱塞泵和液压附件等一维生热、基于ANSYS计算EHA壳体的三

http://bhxb.buaa.edu.cn

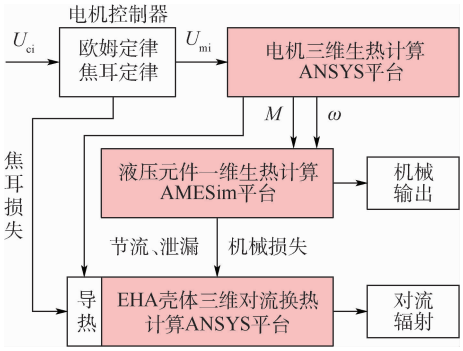

图 3 EHA 的“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法

Fig. 3 “3D-1D-3D” thermodynamic modeling method of EHA

维换热,最后在 AMESim 平台上建立 EHA 的热力学模型。

下面分别建立各个元部件热力学模型,并进行仿真验证,揭示 EHA 油液变化规律及影响因素。

2 EHA 热力学建模

2.1 伺服电机的三维热力学建模

电机生热主要包括 3 大部分,即转子涡流生热、定子线圈生热、转子与油液摩擦生热。其中,根据焦耳定律计算线圈生热,基于 Maxwell 的 RMxprt 模块计算定子损耗。转子与周围介质相互作用时摩擦生热,在一般低速风冷电机中,该损耗比较小,但在 EHA 高速油冷电机中转子与油液摩擦热量远大于普通风冷电机,直接影响 EHA 热力学建模精度。

基于 ANSYS 平台进行电机的三维热力学研究,其三维热力学建模架构如图 4 所示。

根据图 4 所示架构建立 EHA 高速直流电机的热力学模型,图 5 为电机转速为 18 000 r/min 时电机轴截面稳态温度场,图 6 为电机总损耗随转速变化曲线。

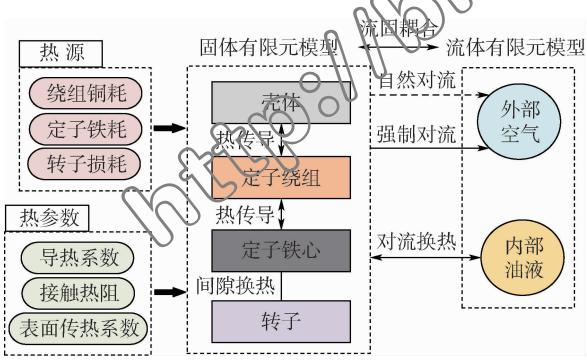

图 4 电机三维热力学建模架构

Fig. 4 3D thermodynamic modeling architecture of motor

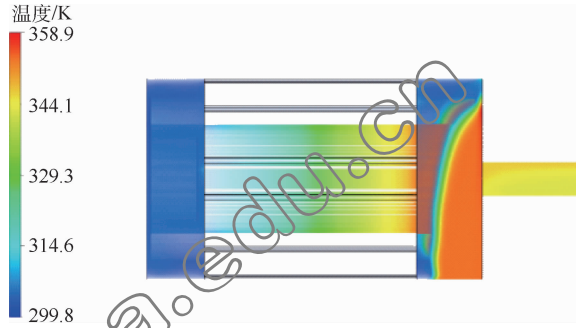

图 5 转速为 18 000 r/min 时电机轴截面稳态温度分布

Fig. 5 Steady temperature distribution of motor axial section when speed is 18 000 r/min

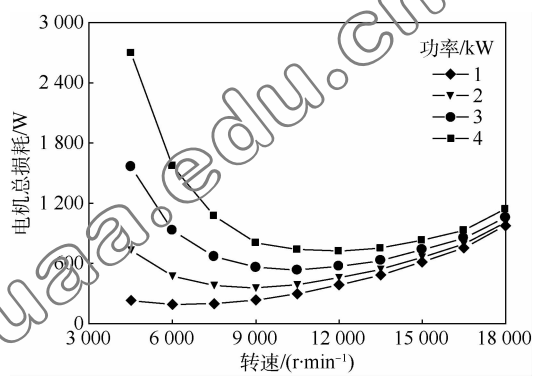

图 6 不同功率下电机总损耗随转速变化曲线

Fig. 6 Total loss-speed curves of motor in different power conditions

2.2 伺服电机以外部件的一维热力学建模

2.2.1 电机控制器热力学模型

晶体管电压降 U_{ce} 为

$$U_{ce} = U_{ce0} + R_{ce}I \tag{1}$$

式中:U_{ce0} 为晶体管零电流电压降;R_{ce} 为晶体管线性电阻率;I 为电流。

二极管压降 U_d 为

$$U_d = U_{d0} + R_dI \tag{2}$$

式中:U_{d0} 为零电流下的二极管压降;R_d 为二极管线性电阻率。

电机控制器的生热 H_c 为

$$H_c = U_dI\beta + U_{ce}I(1-\beta) + U_{sw}I \tag{3}$$

式中:β 为占空比;U_{sw} 为开关损耗的等效压降。

2.2.2 柱塞泵热力学模型

柱塞泵生热包括泄漏生热和摩擦生热。柱塞泵的泄漏途径包括柱塞副、滑靴副和配油盘副,摩擦生热主要根据机械效率计算。

1)柱塞副泄漏生热

单个柱塞副的泄漏生热功率 H_z 为

$$H_z = \frac{\pi d_z\Delta p_z^2}{12\mu l_z}\delta_z^3(1 + 1.5e^2) \tag{4}$$

http://bhxb.buaa.edu.cn

式中:H_z 为柱塞副的生热量;d_z 为柱塞直径;Δp_z 为柱塞副前后压差;μ 为动力学黏度;δ_z 为柱塞副间隙;e 为偏心比;l_z 为柱塞副的密封长度。

2)滑靴副泄漏生热

单个滑靴副的泄漏生热功率 H_s 为

$$H_s=\frac{\pi d_k^4\delta_s^3\Delta p_s^2}{128\delta_s^3\mu l_s+6\mu d_k^4\ln\dfrac{r_2}{r_1}} \tag{5}$$

式中:H_s 为滑靴的生热量;其他参数见文献[16]。

3)配油盘副泄漏生热

配油盘泄漏损失功率 H_p 为

$$H_p=k_p\frac{\pi\delta_p^3\Delta p_p^2}{12\mu}\left(\frac{1}{\ln\dfrac{r_4}{r_3}}+\frac{1}{\ln\dfrac{r_6}{r_5}}\right) \tag{6}$$

式中:参数见文献[16]。

4)机械摩擦生热

柱塞泵在零流量运转过程中,不对外做功,因此其机械能大部分转化为内能,最终变为油液的热能进入油液内部。若柱塞泵的输入扭矩为 M、输入转速为 ω、机械效率为 η,则由于机械摩擦带来的生热功率 H_m 为

$$H_m=M\omega\eta \tag{7}$$

根据式(4)~式(7),建立柱塞泵的生热模型:

$$H_{pump}=n(H_z+H_s)+H_p+H_m \tag{8}$$

式中:H_{pump} 为柱塞泵生热量;n 为柱塞个数。

2.2.3　液压缸热力学模型

液压缸生热 H_{cyl} 为

$$H_{cyl}=(p_h-p_l)k_{cyl}\rho_{oil}c_{oil} \tag{9}$$

式中:ρ_{oil} 为液压油密度;c_{oil} 为液压油热容;p_h 为高压腔压力;p_l 为低压腔压力;k_{cyl} 为泄漏系数。

2.2.4　液压阀热力学模型

液压阀的生热主要是由节流损失造成的,液压阀功率损失 H_v 为

$$H_v=\Delta p_v Q \tag{10}$$

式中:Δp_v 为流体经液压阀以后的压降;Q 为流经液压阀的流量。

2.2.5　壳体辐射换热模型

EHA 电机及液压部分壳体辐射换热 H_r 为

$$H_r=\sigma\varepsilon A_e(T_s^4-T_a^4) \tag{11}$$

式中:σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数;ε 为辐射系数;A_e 为辐射面积;T_s 为壳体温度;T_a 为环境温度。

2.2.6　EHA 内部传热模型

考虑电机产生热量通过壳体向油液传热,传递热量 H_{in} 为

$$H_{in}=\alpha A_{in}(T_h-T_l) \tag{12}$$

式中:α 为等效传热系数;A_{in} 为等效传热面积;T_h 为高温侧温度;T_l 为低温侧温度。

2.2.7　液压油的黏温特性

液压油动力学黏度 μ 修正如下:

$$\mu=\mu_0\left(\frac{T_0}{T}\right)^k \tag{13}$$

式中:μ_0 为油液温度 T_0 时动力黏度;T 为油液当前温度;k 为黏温常数。

2.2.8　液压油的密温特性

Skydrol 500B-4 液压油密度 ρ_{oil} 修正如下:

$$\rho_{oil}=1\,045-k_{oil}(T-37) \tag{14}$$

式中:k_{oil} 为修正系数。

2.3　EHA 壳体的三维对流换热计算

EHA 的壳体换热包括对流和辐射,其中对流占主导地位,对流换热与 EHA 形状、风速方向等密切相关。为了提高对流换热计算精确性,将 EHA 分为伺服电机、柱塞泵、增压油箱、作动器等部分。

基于 ANSYS 平台建立 EHA 各个部分的三维换热模型,计算不同高度、不同风速下各个部分对流换热系数。以增压油箱为例,环境温度为 20℃、风速为 5 m/s 时增压油箱与地面空气的对流换热系数如图 7 所示,平均对流换热系数为 33.8 W/(m^2·K)。

采用类似方法可以计算 EHA 不能部位、不同温度时的散热量。

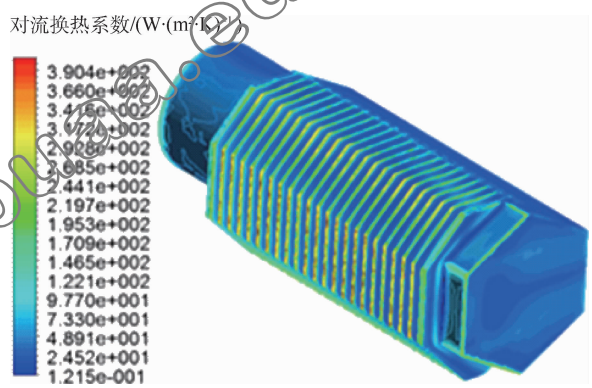

图 7　风速为 5 m/s 时增压油箱对流换热系数

Fig. 7　Convective heat transfer coefficient of oil tank when wind speed is 5 m/s

2.4　基于 AMESim 的 EHA 热力学整体建模

在完成伺服电机的三维生热、液压元件的一维生热和 EHA 壳体的三维换热模型后,根据 EHA“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法,在 AMESim 平台上搭建 EHA 的热力学模型,如图 8 所示。

http://bhxb.buaa.edu.cn

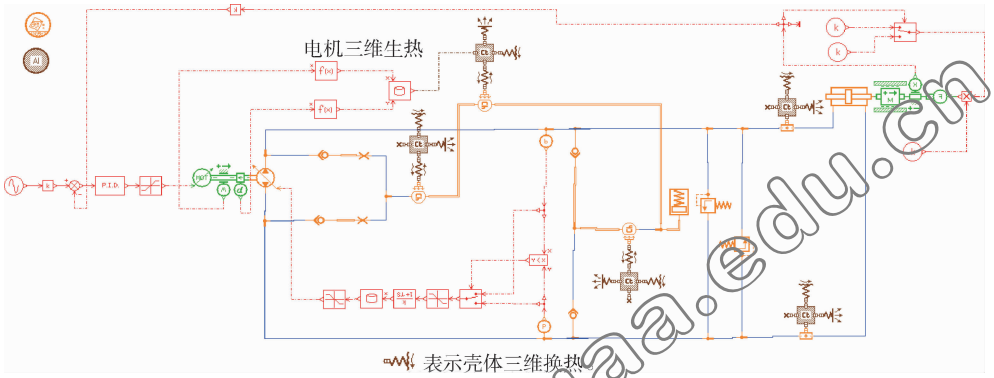

图 8 EHA 的“三维 + 一维 + 三维”热力学模型

Fig. 8 “3D-1D-3D” thermal model of EHA

3 EHA 热仿真分析

在完成 EHA“三维 + 一维 + 三维”热力学建模后,根据表 1 所示的 EHA 参数,仿真揭示 EHA 油液温升规律,探讨作动器工作频率、负载对油液温升的影响。

表 1 EHA 参数

Table 1 EHA parameters

参 数	数 值
柱塞泵排量/(mL·r^{-1})	4.3
定子绕组电阻/Ω	1.15
定子环电感/H	0.01
磁链/Wb	0.134
晶体管正向压降/V	1
晶体管电阻/Ω	0.013
活塞直径/mm	65
作动器行程/mm	50
二极管电阻/Ω	0.008 7
二极管正向压降/V	1.3

3.1 EHA 油液温升规律

EHA 作行程为 50 mm 的阶跃响应,液压缸负载 F 在 1.7 s 内由 0 增加到 70 kN,经过 5 400 s 后伺服电机内油液温度、柱塞泵内油液温度和增压油箱内油液温度如图 9 所示。

经过 5 400 s 运行,在保持最大载荷情况下,EHA 伺服电机内油液最高温度为 107.9℃,柱塞泵内油液最高温度为 101.8℃,增压油箱内最高温度为 80.9℃,伺服电机内部油液温度最高,因此控制 EHA 主要是防止伺服电机部分油液过热。

3.2 工作频率对油液温升影响

负载 F = 3.45 kN,正弦响应的幅值 A = 2.1 mm、均值为 0,工作频率分别为 $f_1 = \frac{2}{3}$ Hz,f_2 = 1 Hz,f_3 = 2 Hz,f_4 = 3 Hz,工作时间为 1 800 s,4 种工况下伺服电机的油液温度变化如图 10 所示。

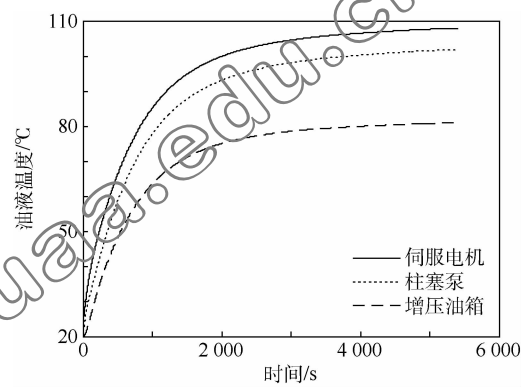

图 9 不同部件内油液温度

Fig. 9 Oil temperature in different parts

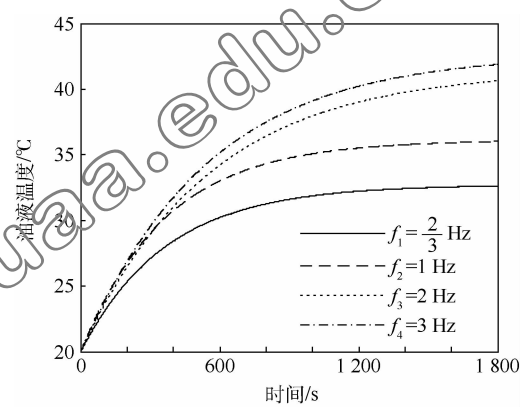

图 10 不同工作频率下伺服电机的油液温度

Fig. 10 Oil temperature of servo motor under different working frequency conditions

由图 10 可知,EHA 油液温度随着工作频率增加而升高,因此在 EHA 达到平衡点时,在误差允许范围内增大控制周期,有利于控制 EHA 系统油液温度。

3.3 负载对油液温升影响

EHA 阶跃响应,幅值 A = 50 mm,负载分别为 F_1 = 20.7 kN,F_2 = 34.5 kN,F_3 = 50 kN,工作时间为 1 800 s,伺服电机的油液温度变化如图 11 所示。

http://bhxb.buaa.edu.cn

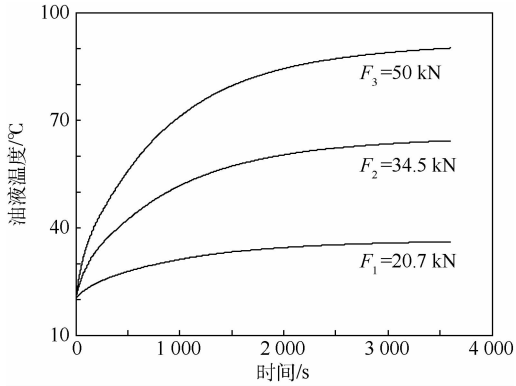

图 11　不同负载下伺服电机的油液温度

Fig. 11　Oil temperature of servo motor under different load conditions

由图 11 可知,EHA 的油液温度随着负载增大而增大,负载大小是影响 EHA 油液温升的主要因素之一。

4　实验验证

为了验证 EHA“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法的正确性,在地面室温环境下进行 EHA 的空载实验,EHA 运动规律如表 2 所示。

EHA 为空载,环境温度为 T_a = 20℃,伺服电机部分油液温度仿真数据和实验数据如图 12 所示。

由图 12 可知,EHA 伺服电机部分油液温升仿真数据和实验数据基本吻合,最大误差在 5℃以内,满足工程应用要求,验证了 EHA“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法的正确性。

表 2　EHA 运动规律

Table 2　Motion laws of EHA

正弦信号序号	幅值/mm	频率/Hz	周期/s	持续时间/s
1	2.1	1	1	506
2	7	2/3	1.5	33
3	28	1/3	3	51
4	42	1/5	5	10

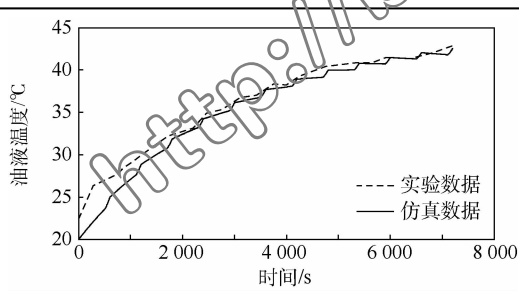

图 12　伺服电机油液温度仿真数据与实验数据对比

Fig. 12　Comparison between simulation data and experimental data of oil temperature of servo motor

5　结　论

本文详细分析了 EHA 的能量转化及流动途径,在此基础上提出了“三维 + 一维 + 三维”热力学建模方法,分别建立了 EHA 各部件及整体的热力学模型,并通过实验进行了验证,从而解决了复杂机电液系统的热力学精确建模问题,对于 EHA 的热设计具有重要的指导意义。

1) EHA 的油液温度随着工作频率增加而升高。EHA 达到平衡点时,在误差允许范围内增大控制周期,有利于控制系统油液温度。

2) EHA 每个部分生热和散热能力不同,在体积和质量严格要求情况下,EHA 的热控制方法有待于进一步深入研究。

参考文献(References)

[1] TODESCHI M. A380 flight control actuation lessons learned on EHAs design[C]// Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, 2007:21-26.

[2] TAKEBAYASHI W, HARA Y. Thermal design tool for EHA [C]// Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components, 2004:15-19.

[3] LI J, ZHANG X, YIN Y B. Dynamic temperature simulation of an accumulator in aircraft hydraulic systems[C]// 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:653-657.

[4] STADLBAUER K, POLTSCHAK F, RAFETSEDER D, et al. A spice-based lumped parameter thermal model with geometrically distributed elements for electro-hydraulic actuators[C]// 2012 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012:511-516.

[5] LI C G, JIAO Z X. Calculation method for thermal-hydraulic system simulation[J]. Journal of Heat Transfer, 2008, 130(8): 084503.

[6] SCOTT T, UPHOLD J. Thermal modeling of power steering system performance[C]// SAE World Congress & Exhibition, 2008: 1039-1044.

[7] LANA E D, DE NEGRI V J. A new evaluation method for hydraulic gear pump efficiency through temperature measurements [C]// SAE 2006 Commercial Vehicle Engineering Congress & Exhibition, 2006:3503.

[8] LI J, XU J L, ZHANG X, et al. An estimation method of the fluid temperature for commercial aircraft hydraulic systems[C]// 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010:2962-2965.

[9] 卢宁,付永领,孙新学. 基于 AMEsim 的双压力柱塞泵的数字建模与热分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32

http://bhxb.buaa.edu.cn

(9):1054-1058.
LU N,FU Y L,SUN X X. Digital modeling and thermal analysis of double pressure piston pump based on AMEsim[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2006,32(9):1054-1058(in Chinese).

[10] 李永林,徐浩军,曹克强,等.航空柱塞泵全工况效率分析及热力学建模[J].北京航空航天大学学报,2010,36(12):1470-1472.
LI Y L,XU H J,CAO K Q,et al. Efficiency analysis and thermodynamic modeling of aircraft piston pump in all conditions[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2010,36(12):1470-1472(in Chinese).

[11] NAVARRO R. Performance of an electro-hydrostatic actuator on the F-18 systems research aircraft:NASA/TM-97-206224[R]. Washington,D. C.:NASA,1997.

[12] ANDERSSON J,KRUS P,NILSSON K,et al. Modeling and simulation of heat generation in electro-hydrostatic actuation systems[C]// Proceedings of the 4th JHPS International Symposium on Fluid Power,1999:537-542.

[13] JOHANSSON B,ANDERSSON J,KRUS P. Thermal modelling of an electro-hydrostatic actuation system[C]// Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components,2001:48-53.

[14] ENGELHARDT J. Thermal simulation of an aircraft fluid power system with hydraulic-electrical power conversion units[C]// Proceedings of the 1st FPNI-PhD Symposium,2000:435-448.

[15] LI K,LV Z,LU K,et al. Thermal-hydraulic modeling and simulation of piston pump in electro-hydrostatic actuator system[C]// 2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). Piscataway,NJ:IEEE Press,2015:1097-1101.

[16] 盛敬超.液压流体力学[M].北京:机械工业出版社,1980.
SHENG J C. Hydraulic fluid mechanics[M]. Beijing:China Machine Press,1980(in Chinese).

作者简介:

王岩 男,博士,副教授。主要研究方向:液压系统控制、数值模拟与热管理等。

A thermodynamic modeling method of electro-hydrostatic actuator and law of oil temperature rise

WANG Yan[1,*], GUO Shengrong[2], YANG Le[2]

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. AVIC Jincheng Nanjing Engineering Institute of Aircraft System, Nanjing 211106, China)

Abstract: Electro-hydrostatic actuator (EHA), one of the key subsystems in the more electric aircraft, can reduce the size and weight of airborne equipment because of its highly compact design. However, the heat dissipation is weakened simultaneously, which can easily lead to an extremely rapid temperature increase and loss of function. In view of the drawbacks of traditional 1D thermal model, a "3D-1D-3D" thermal modeling method was proposed in order to research on the temperature rise of EHA driven by oil-cooled motor. Firstly, the conversion and transfer of energy in EHA were analyzed, aiming to find out the heat source and its diffusion. Further, the "3D-1D-3D" thermal modeling method was proposed considering that the parameters varied with time. Secondly, the 3D thermal model of EHA motor was established in ANSYS including the heat generation module and dissipation module, while the other components, for instance piston pump, hydraulic cylinder, valves, pressurized tank, etc., were studied with 1D thermal models. Finally, the whole "3D-1D-3D" thermal model of EHA was integrated on AMESim platform, and validated by experimental results. The results from simulations and experiments reveal the law of temperature rise in EHA, which provides the theoretical guidance for thermal design of EHA.

Keywords: electro-hydrostatic actuator (EHA); thermodynamic modeling method; motor; law of temperature rise; piston pump

Received: 2017-10-10; **Accepted**: 2017-11-23; **Published online**: 2017-12-20 09:11
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20171219.1632.007.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51375029, 51775013)
* **Corresponding author**. E-mail: wybuaa@buaa.edu.cn

http://bhxb.buaa.edu.cn