

图 3 分段线性收缩 - 扩张因子 QPSO 算法优化过程 目标函数值变化曲线

6 结束语

经典的 PSO 算法束缚状态限制了粒子在 1 个有 限的区域, 而 QPSO 算法中由概率密度函数描述,束 缚态的粒子可以一定概率出现在整个可行搜索空间 的任何区域,甚至是距 p 点较远的位置,这一位置可 能比种群目前的 G_{best}好很多,使 QPSO 算法具有更好 的全局收敛性。

本文使用不同的参数设计算法完成了对某型航 空发动机非线性稳态模型的求解。求解的数值试验说 明在合理的算法参数设置下,引入平均最好位置的 QPSO 算法,能够以一定的概率获得高精度的全局最 优解,验证了基于随机搜索的现代优化算法求解发动 机非线性模型具有良好的效果。

参考文献:

[1] 钟一文. 智能优化方法及其应用研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2005.

ZHONG Yiwen. Intelligent optimization algorithm and its application study[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2005. (in Chinese)

- [2] 鲁峰, 黄金泉, 佘云峰, 等. 航空发动机状态变量模型的 QPSO 寻优混合求解法[J]. 推进技术, 2011(5): 25-29.
 LU Feng, HUANG Jinquan, SHE Yunfeng. State space modeling based on QPSO hybrid method for aeroengines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011 (5): 25-29. (in Chinese)
- [3] 张强, 李本威, 马力. 粒子群算法在航空发动机部件模型求 解中的应用[J]. 系统仿真学报 ,2009(12) :78-81.
 ZHANG Qiang, LI Benwei, MA Li. Application of particle swarm optimization in solution to aeroengine component level

model[J]. Journal of System Simulation,2009(12): 78-81. (in Chinese)

[4] 骆广琦, 刘波, 宋頔源. 基于混合粒子群算法的航空发动机 数学模型解法[J]. 燃气涡轮试验与研究 2011(2) 23-25.

LUOGuangqi,LIUBo, SONG Diyuan. Hybrid particle swarm optimization in solving aeroengine nonlinear mathematical model [J]. Gas Turbine ExperimentandResearch, 2011(2): 23-25.(inChinese)

[5] 高永超. 智能优化算法的性能及搜索空间研究[D]. 济南:山东大学,2007.

GAO Yongchao. Rearch on performance and search space of intelligent optimization algorithms [D]. Jinan: Shandong University,2007.(inChinese)

[6] 莫愿斌. 粒子群优化算法的扩展与应用 [D]. 杭州:浙江大 学 2006.

MO Yuanbin. Extension and application of particle swarm optimization algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.(inChinese)

- [7] 龙海侠, 须文波, 王小根, 等. 基于选择操作的量子粒子群 算法[J]. 控制与决策 2010(10):1499-1506.
 LONG Haixia, XU Wenbo, WANG Xiaogen, et al. Using selection to improve quantum-behave particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2010(10): 1499-1506. (inChinese)
- [8] 靳文辉. 自适应变异量子粒子群优化算法及其应用研究[D]. 无锡 :江南大学 ,2008.

JIN Wenhui. Adaptive quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with mutation operator and its application [D]. Wuxi: Southern Yangtze University, 2008. (in Chinese)

 [9] 石永生, 陈家琪. 基于高斯变异的量子粒子群算法 [J]. 电脑 与信息技术,2010(6) 9-12.
 SHIYongsheng, CHEN Jiaqi. An improved quantum-behaved particle swarm optimization based on Gaussian mutation[J].
 Computer and Information Technology, 2010 (6): 9-12. (in Chinese)

[10] 王小根, 龙海侠, 孙俊. 基于高斯扰动的量子粒子群优化 算法[J]. 计算机应用研究 2010(6) 2093-2096.
WANGXiaogen,LONG Haixia,SUNJun.Quantum-behaved particleswarm optimizationbasedonGaussiandisturbance[J].
Application Research of Computers, 2010 (6): 2093-2096. (in Chinese)

[11] 屈百达, 焦竹青, 徐保国. 多量子粒子群协同优化算法研 究[J]. 计算机工程与应用 2008(7):72-74.

QU Baida, JIAO Zhuqing, XU Baoguo. Research on quantum-behavedparticleswarmscooperative optimization[J]. Computer EngineeringandApplications, 2008 (7): 72-74. (in Chinese)

- [12] 孔丽丹. 自适应的及其基于动态邻域的具有量子行为粒子 群优化算法研究[D]. 无锡 江南大学 ,2008.
 KONG Lidan. Adaptive quantum-behaved particle swarm optimizationwithneighbourhoodoperator [D].Wuxi:Southern YangtzeUniversity,2008.(inChinese)
- [13] 须文波. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡 江南大 学,2008.
 XU Wenbo. Study on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[D]. Wuxi:SouthernYangtzeUniversity, 2008.(inChinese)
- [14] Huang Z, Wang Y J, Yang C J et al. A new improved quantum-behaved particle swarm optimization model[C]// ICIEA:2009 4th IEEE Conference on IndustrialElectronics andapplications,2009 :1551-1555.
- [15] Ma Y, Liu Y, Chen Y P, et al. PQPSO: A new parallel quantum-behavedparticleswarmoptimization [C]// DCABES 2008Proceendings 2008 :46-51.
- [16] Xi M L, Sun J, Xu W B. An improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with weighted mean best position [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008,205(2) :751-759.
- [17] Ma Y, Liu Y, Yang D Y, et al. Improvement on parallel

AQPSO Using the best position [C]// WKDD: 2009 Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data MiningProceedings,2009 : 825-828.

- [18] 方伟, 孙俊, 谢振平, 等. 量子粒子群优化算法的收敛性分析及控制参数研究[J]. 物理学报,2010(6) 3686-3694.
 FANG Wei, SUN Jun, XIE Zhenping, et al. Convergence analysis of quantum-behaved particle swarm optimization algorithm and study on its control parameter [J]. ACTA PhysicaSinica, 2010(6):3686-3694.(inChinese)
- [19]LiuY,MaY,CaoBX,etal.Solvingconstrainedoptimization problems with adaptive quantum-behaved particle swarm optimization[C]//DCABES2008Proceedings,2008 £49-653.

 [20] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.221-230.
 LIAN Xiaochun,WUHu.Aeroengineprinciples [M]. Xi 'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)

 [21] 隋岩峰,于达仁,刘志明. 涡扇发动机气动热力模型的 Matlab 表述[J]. 航空发动机 2005,31(4) 36-37.
 SUI Yanfeng, YU Daren,LIUZhiming. Matlab formulation of Turbofan engine pneumatic thermal model [J]. Aeroengine, 2005 31(4):36-37.(inChinese)

(上接第16页)

fuel specification and progress [M]. Beijing China petrochemicalpress,2011:12-34. (in Chinese)

[5] 罗伊兰顿著.飞机燃油系统[M]. 上海:上海交通大学出版社,
 2010:9-84.
 Roy Langton. Aircraft fuel systems [M]. Shanghai : Shanghai

JiaoTongUniversityPress,2010:9-84. (in Chinese) [6] 朱锟, 邓宏武. 超临界压力下航空煤油结焦换热综述及实验

- [J]. 航空动力学报,2010,25(11):2473-2475. ZHU Kun, DENGHongwu. Review and experimental study of the coke deposition and heat transfer characteristicsofaviation kerosene at supercritical pressure [J]. Journal of Aerospace Power,2010,25(11):2473-2475. (in Chinese)
- [7] 金迪, 徐国强, 王英杰,等. 不锈钢表面氧化对 RP-3 航空煤 油热氧化结焦的影响[J]. 航空发动机,2010(1):34-37.
 JIN Di, XU Guoqiang, WANG Yingjie, et al. Influence of stainless steel oxidizing on the thermal oxidation coking of RP-3 aviation kerosene[J].Aeroengine, 2010, 36(1):34-37. (inChinese)
- [8] 江晨曦,仲峰泉. 超临界压力下航空煤油流动与传热特性试验[J]. 推进技术,2010,31(2):231-233.
 JIANG Chenxi, ZHONG Fengquan.Experiment on convective

heattransfer ofaviation kerosene undersupercritical pressures [J].Journal ofPropulsionTechnology,2010,31(2):231-233. (in Chinese)

[9] 朱玉红,米镇涛,张香文. 航空燃料高温裂解条件下热稳定添加剂的研究进展[J].化工进展,2006,25(6):595-599.ZHU Yuhong, MI Zhentao, ZHANG Xiangwen. Recent

progress of thermal stabilizers in pyrolysis of jet fuel at elevated temperature [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2006,25(6):595-599. (in Chinese)

[10] 李华强,费逸伟,姜旭峰. 喷气燃料在合金表面的碳沉积[J].
 表面技术,2005,34(4):62-64.
 LIHuaqiang, FEIYiwei,JIANG Xufeng. Carbondeposits on

the surface of superalloys from jetfuel[J].SurfaceTechnology, 2005,34(4):62-64. (in Chinese)

[11] 王英杰, 徐国强. 进口温度影响航空煤油结焦特性实验[J]. 航空动力学报,2009,24(9):1973-1976.

WANG Yingjie, XU Guoqiang. Experimental study of influence of inlet temperature on aviation kerosene coking characteristics [J].JournalofAerospacePower,2009,24(9): 1973-1976. (in Chinese)

轴对称矢量喷管执行机构协同控制方案设计

陈杰1,周文祥2,周永权1,杨征山1

(1.中航工业航空动力控制系统研究所,江苏无锡 214063;2.南京航空航天大学能源与动力学院,南京 210016)



陈杰(1985),男,在读硕士研究生,研 究方向为航空发动机建模与仿真技术、控 制律总体设计。

收稿日期:2012-02-09

摘要:针对在航空发动机轴对称矢量喷管控制中出现的3个执行机构非等时同步运动问题,根据同步控制原理对轴对称矢量喷管执行机构控制回路设计22种协同控制方案,并通过全数字仿真及半物理试验对基于偏差比例的变电流协同控制方案进行 了分析和验证。结果表明 在给定任意偏转角和方位角时,实现了轴对称矢量喷管3个 执行机构等时同步运动,矢量偏转控制稳定、安全,且精度高、速度快。

关键词 轴对称矢量喷管 协同控制 同步运动 ;半物理仿真 ;航空发动机

Design of Actuator Coupling Control Schemes for Axial-symmetric Vectoring Exhaust Nozzle

CHEN Jie ¹ 夜HOU Wen - xiang² 夜HOU Yong - quan ¹ 夜ANG Zheng - shan ¹
渊. AVIC Aviation Motor Control System Institute, Wuxi Jiangsu 214063, China;
2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China冤

Abstract: In order to solve the problem of three actuator moving out of sync in the control of aeroengine axial-symmetric vectoring exhaust nozzle, two kinds of actuator loop coupling control schemes were designed for vectoring nozzle control based on synchronous control theory, and the loop coupling control scheme of varying electric current based on error proportion was analyzed and verified by digital simulation and semi-physical simulation test. The results show that the loop coupling control scheme of varying electric current based on error proportion realizes three actuators moving synchronically and ending at the same time in certain deflection angle and azimuth, and the vectoring control is steady and safe, which has excellent performance on response speed and accuracy.

Key words: axial-symmetric vectoring exhaust nozzle; coupling control; synchronous movement; semi-physical simulation; aeroengine

0 引言

轴对称矢量喷管(AVEN)控制技术是当今世界最 先进战斗机采用的典型矢量推力控制技术之一,通过 控制矢量喷管的偏转来改变发动机尾喷流的方向,使 战斗机具备过失速机动及短距起降的能力^[1-2]。典型 AVEN尾喷管出口(简称 A₉)矢量控制由 3 个作动筒驱 动。作动筒输出相同位移实现 A₉ 收扩调节 输出不同 位移实现偏转调节。AVEN 控制系统控制回路分为内 环和外环,内环即执行机构位移控制回路,或称小闭环 控制回路,实现作动筒的位移量闭环控制,外环根据飞 行控制系统输出的矢量方位角 兹和矢量偏转角 啄由控 制律解算出 3 个作动筒位移给定量,然后通过执行机 构小闭环回路控制作动筒运动 实现 A。面积调节和矢 量偏转控制。

本文在 AVEN 执行机构小闭环控制回路设计的 基础上 研究 AVEN 调节机构外环协同控制方案 实现 AVEN 矢量控制。

1 AVEN 执行机构回路独立控制方案

典型的 AVEN 结构如图 1 所示¹⁸。因 茲和 啄不能由 传感器测得 A₉ 外环控制通常采用开环控制方式,并以 3 个作动筒平均控制精度近似 AVEN 控制精度,初步 方案如图 2 所示,3 个执行机构小闭环回路独立控 制。在图中 L₁(或 L₂,L₃)为执行机构回路序号或作动筒 反馈位移 L_{10m} 为位移给定量 L_{VDT} 为线位移传感器 A₈ 为发动机喷管喉道面积。通常 3 个小闭环回路组件控

制系统结构完全相同。



图1 典型 AVEN 装置结构



图 2 矢量喷管调节初步控制律方案

AVEN 独立控制方案进行了数字仿真验证。 茲印 啄 阶跃给定(0毅0毅(270毅20毅(0毅0毅) 仿真结果如图 3 所示。L₁、L₂L₃位移变化量分别为 18.5%、6%、28%, 调节时间分别为 0.30、0.13、0.40 s,作动筒位移调节出 现逐个到位现象。若 茲印 啄为斜坡给定,若是低斜率斜 坡 3 个矢量作动筒控制较好,若是高斜率斜坡,仿真 结果类似阶跃也出现作动筒到位不等时的现象。





完成 ;本文研究的矢量控制装置按以上控制方案 兹0毅 啄0~203% [跃给出 ,通过仿真发现 ,3 个作动筒上升时间 最快为 0.35 s ,最慢为 0.65 s ,矢量喷管可能出现台阶 式运动。随着矢量喷管技术进一步发展 ,啄进一步加大 , 采用常规的独立控制方案会使 A。作动筒台阶式运动 更明显。为此 ,必须保证给定任意 茲和 啄时 ,控制系统 才能使 3 个作动筒同时运动到位 ,以保证发动机工作 安全。

2 AVEN 执行机构协同控制方案

2.1 同步控制方法

为解决矢量喷管作动筒等时运动到位问题,可以 参考同步控制理论设计 AVEN 执行机构协同控制方 案。最常见的同步控制是位置同步与转速同步控制等。 同步控制方式ⁿⁿ有并行、主从、交叉耦合ⁱⁿ、虚拟总轴ⁱⁿ和 偏差耦合控制等。其中,主从控制是将其中某个执行机 构控制回路作为主回路,其输出值作为其余回路的参 考。双回路主从控制原理如图4所示。偏差耦合控制是 将某一分回路执行机构的反馈同其它回路执行机构回 路反馈分别作差,然后将得到的偏差相加,作为该回 路执行机构的补偿信号。这种控制可以很好地实现同 步性,并且稳态和瞬态同步精度均较高。3 回路偏差 耦合控制原理如图5所示。



2.2 AVEN 执行机构协同控制方案设计及仿真验证

显然,前述同步控制理论不能直接应用于 AVEN 矢量喷管控制。AVEN 矢量喷管等时运动控制要求在 给定任意 茲和 啄时作动筒等时运动到位,亦可理解为 "运动时间同步"本文定义该同步控制为"协同控制"。 AVEN 执行机构回路协同控制方案可融合偏差耦合控 制和主从控制的特点进行设计。

(1)基于偏差比例的变偏差给定协同控制方案

基于偏差比例的变偏差给定协同控制原理如图 6 所示,该控制是指3个作动筒控制回路各自计算给定 信号与反馈信号的偏差(下文简称偏差),将3个回路 原始偏差信号绝对值最大的回路作为主回路;其它回 路偏差按与最大偏差的比例进行比例缩减,即综合耦 合矫正,矫正后偏差经过相同的控制器运算后,得到与 偏差成反比的电液伺服阀控制电流,3个矢量作动筒 由此实现变速运动,调节时间相等且由主回路确定。当 某回路偏差接近零时,由于存在偏差比例,相关比例系 数会急剧放大,导致稳态控制精度变差,所以需对偏差 耦合器控制进行限制,视时自动退出耦合控制。



图 6 基于偏差比例的变偏差协同控制原理

采用该方案进行与独立控制方案相同内容的仿 真 结果如7所示。该协同控制基本实现了AVEN作动 筒协同控制。但是当偏差耦合器输出矫正偏差很大



图 7 矢量偏转作动筒运动异常曲线

时,电液伺服阀实际电流会达饱和值(+40mA或 -40mA),作动筒运动速度达到极限,会使差耦合器工 作失效;当输出电流由饱和转变为非饱和时,其余回路 电流输出容易发生突变,由此会引发3个作动筒运动 畸形。

(2)基于偏差比例的变电流协同控制方案

针对电液伺服阀输出电流畸形,提出了基于偏差 比例的变电流协同控制方案。运用3个作动筒的给定 值、反馈值及其信号偏差 对执行机构回路进行综合耦 合 并得到矫正系数;控制器根据偏差信号计算电液伺 服阀初步给定电流,再根据矫正系数调制出实际给定 电流,从而控制3个作动筒变速运动。在3个回路中, 将原始偏差信号绝对值最大的1个回路作为主回路, 其余为从回路 控制逻辑如图8所示。



图 8 基于偏差比例的变电流协同控制原理

采用该方案进行相同内容的仿真,如图 9 所示。结 果表明,该方案较好地实现了协同控制,保留了前 1 种 方案的优点,对小闭环控制器控制系数不限制,作动筒 的畸形运动不再出现。



采用该方案进行斜坡响应仿真,给定 茲75毅系0~20 38.1 s 斜坡信号,仿真结果如图 10 所示。即使在电液伺服阀输出电流饱和的大斜率斜坡给定下,3 个作动筒运动仍保持较好的协同性。



图 10 20毅 0.1 s 偏转斜坡跟踪仿真曲线

以上设计和仿真结果表明:基于偏差比例的变电 流协同控制较好地实现了 AVEN 作动筒等时同步控 制,该系统控制精度较高,易于工程实现,是 AVEN 执 行机构控制回路外环控制的首选方案。

3 AVEN执行机构协同控制半物理试验与分析

3.1 半物理试验

矢量偏转半物理试验分别采用独立控制方案和基于偏差比例的变电流协同控制方案¹⁰⁰,试验范围在 兹0**毅**和 兹180毅琢0~10毅当 AVEN 以该方位角做偏转 时,作动筒 L₁和 L₃位移均相同,为了使图清晰可辨,在 试验曲线中仅给出 L₁的试验结果。

独立控制方案试验结果如图 11 (a) 所示。图中 VnaSelta=茲VnaDelta=琢2 种结果一样出现时间不同步



图 11 偏转角阶跃给定 AVEN 偏转控制试验结果

现象 图中(0毅新知(180毅10毅阶段 L1、L2调节时间分 别是 0.3、0.6 s。

L₁、L₂、L₃回路采用基于偏差比例的变电流协同 控制方案进行试验 (茲啄 阶跃给定 (0毅0毅 (180毅 10毅、(0毅0毅 ,结果如图 11(b)所示 3 个作动筒等时 同步运动。

3.2 试验结果分析

AVEN 控制采用协同控制方案,通过全数字仿真 和半物理试验 获得的部分试验结果见表 1。

类别	3 个矢量作动筒性能特征		全数字仿真	半物理试验
稳态	稳态误差 /%		0	0.5
动态	(茲啄由(0毅0毅 到(0毅10毅阶跃	上升时间 /s	0.26	0.3
		调节时间 /s	0.37	0.4
		超调量 /%	1.2	1.5
	(茲啄)由(0毅0毅	最大跟踪误差 /%	0.5	1.0
	到(0毅5毅5s斜坡			

表 1 试验结果综合对比

根据理论分析 采用协同控制方案后,只改变原有 系统的动态控制品质 对稳态控制精度影响不大。从表 1 中可见,全数字仿真结果与半物理试验结果非常接 近,但精度有小差异,原因可能是(1)半物理试验数据 受上位机采集精度的影响 (2)A。控制稳定性会对 A。 产生直接影响。综合来看,半物理试验控制品质比全数 字仿真的稍差,但二者偏差很小。

4 结论

(1)针对矢量喷管控制过程中出现的作动筒非 等时同步运动问题,设计了2种 AVEN 执行机构协 同控制方案,经过仿真分析和对比验证,确立了 AVEN 执行机构回路宜采用基于偏差比例的变电流 协同控制方案。

(2)通过全数字仿真和半物理试验对基于偏差比 例的 AVEN 执行机构变电流协同控制方案进行测试及 验证 结果表明:该方案能够实现航空发动机 AVEN 的 收扩与偏转控制,解决了 AVEN 在给定任意 茲印 啄时 执行机构的非等时同步运动问题,矢量喷管偏转具有 稳定、安全、快速、精度高等优点。

参考文献:

[1] 群力. 推力矢量在战斗机上的应用 [J]. 国际航空,1999(1): 20-23. (下转第42页)