

发动机性能量与输入量 的相关性研究*

南京航空航天大学 郁阳琳** 孙健国 兰春贤

【摘要】 展开了相关性研究, 讨论了一种相关性分析的算法, 并在此基础上进行了大量的数字仿真实验, 结果表明通过相关性分析不但可减少计算工作量, 而且即使在传感器有限的情况下, 模型也可很好的跟踪发动机, 两者的匹配效果较好。

主题词: 相关分析 涡轮喷气发动机 跟踪滤波器

分类号: TP391. 91

1 相关性算法

本文主要分析模型修正量与发动机输入及性能量的相关性, 使输入与性能校正回路能校正由于发动机输入与性能量偏离而产生的稳态误差。相关性分析技术是基础性研究工作, 是解析余度及性能寻优技术等的前提。国外也在开展这方面的研究工作, 参见文献[1-3]。

自相关即在同一台发动机中各输入与性能量之间必须遵守热力学和气体动力学规律, 这之间必然存在一定的相互依赖关系。我们称之为自相关性。

表 1 给出某双转子涡轮喷气发动机作自相关性仿真实验的结果。表中第一列数据为对应输入量或性能变化的百分数, 每一行数据表示上述变化引起同一台发动机中其他性能量变化的百分数。由表 1 即可看出同一台发动机中各输入量和性能量间的相互依赖关系—自相关性。

相关性概念则不同。由于发动机的可测量参数是有限的, 很可能少于要修正的发动机模型的输入量和部件性能量, 因此该系统是非确定性的。如果不加取舍地对所有量进行修正必然造成编程复杂, 计算量过大。因此有必要对输入量或性能量进行取舍, 进行相关性分析, 即真实发动机某个性能或输入量发生变化引起输出量变化时, 为了使发动机与机载模型输出保持一致就必须调整机载模型的某个或某些性能或输入量。我们称所调整的模型的量与发动机变化的那个量相关。相关性分析目的在于: 确定模型中与发动机输入及性能量相关的量, 在传感器有限的情况下, 使模型跟上发动机输入以及性能变化, 使其输出与发动机输出匹配。

发动机输出量的选择应满足一定的原则: (1) 反映发动机主要部件的特性及其总体性能。(2) 考虑到实际发动机上不允许安装过多的传感器等情况, 输出量的数目要尽可能少且不能线性相关。(3) 某些反映部件性能与可测量参数成函数关系的重要输出。根据这些原则, 本文选择的输出量为低压转速 N_L 、高压转速 N_H 、高压压气机后总压 P_3 、低压涡轮后总压 P_6 及总

温 T_6 、低和高压喘振裕度 SML 及 SMH 。预选的输入量为主燃油量 WF 、尾喷口面积 A_8 、低压压气机进口总温 T_2 及总压 P_2 。性能量为低压压气机效率 $ETLP$ 及其换算空气流量 CW_2 、高压压气机效率 $ETHP$ 及其换算空气流量 CW_{21} 、高及低压涡轮效率 $ETHT$ 及 $ETLT$ 、高及低压涡轮单位燃气流量功 HHT 及 HLT 。显然, 预选的输入量及性能量比较多。

表 1 发动机自相关性数表 (%)

		WF	$A8$	$ETLP$	$CW2$	$ETHP$	$CW21$	$T2$	HLT	$ETLT$	$ETHT$	HHT	$P2$
WF	1.010	1.010	0.000	0.000	0.512	0.000	0.091	0.000	0.447	0.000	0.000	0.327	0.000
$A8$	1.000	0.000	1.000	0.236	0.838	-0.126	-0.048	0.000	0.853	0.000	0.000	-0.046	0.000
$ETLP$	1.182	0.000	0.000	1.182	0.797	0.000	-0.182	0.000	-0.197	0.000	0.000	0.456	0.000
$CW2$	-0.333	0.000	0.000	-0.473	-0.333	0.000	0.108	0.000	0.003	-0.114	0.000	0.215	0.000
$ETHP$	1.005	0.000	0.000	-0.355	0.268	1.005	0.710	0.000	-0.110	0.000	0.000	-0.089	0.000
$CW21$	0.364	0.000	0.000	-0.236	0.137	0.503	0.364	0.000	-0.056	0.000	-0.113	-0.095	0.000
$T2$	1.000	0.000	0.000	-0.118	-0.332	0.000	-0.065	1.000	0.697	0.000	0.000	0.751	0.000
HLT	0.297	0.000	0.000	0.118	0.174	0.000	-0.243	0.000	0.297	0.000	0.000	-0.289	0.000
$ETLT$	1.029	0.000	0.000	0.236	0.720	-0.126	-0.039	0.000	0.733	1.029	0.000	-0.037	0.000
$ETHT$	0.907	0.000	0.000	-0.355	0.271	0.126	0.702	0.000	-0.103	0.000	0.907	0.863	0.000
HHT	0.267	0.000	0.000	-0.118	0.052	0.126	0.130	0.000	-0.017	0.000	0.000	0.267	0.000
$P2$	0.997	0.000	0.000	0.000	-0.345	0.000	-1.00	0.000	-0.277	0.000	0.000	-0.330	0.997

由以上量的选择可以看出: 输出量(即可测量)只有 7 个, 而输入量与性能量有 12 个。这个系统是不确定的, 即部件跟踪滤波器 CTF 的输入与性能校正回路不能准确地跟踪发动机某个量的变化。从数学角度上讲就是求解 12 维变元的 7 维非线性方程, 这组方程有无穷多组解。相关性算法: 在某个稳态点, 小范围内逐一地改变发动机的 12 个输入量与性能量, 记录下发动机输出量变化; 在与发动机相同的稳态点, 求出模型的雅可比矩阵, 使方程线性化, 并采用广义逆法, 求出雅可比矩阵的 Moore-Penrose 广义逆。广义逆法的特点在于可解决雅可比矩阵可能出现奇异的问题, 且求出的这组解是方程唯一的极小范数解。它反映了当发动机的输入量与性能量变化时, 模型修正量的变化情况。

2 相关性分析结果

表 2 为某双转子涡喷发动机作相关性仿真实验的结果。表中第一列数据为发动机对应输入量或性能量所给定的变化的百分数, 每一行数据表示为了使模型与发动机的输出一致, 模型中输入及性能量变化的百分数。从表 1 与表 2 比较可以看出: 表 1 中 WF 、 A_8 、 T_2 、 P_2 四个输入量中某个量变化时, 不会影响其他的输入量, 只会影响性能量; 表 2 的数据基本上是对称的, 发动机的输入量变化或性能量变化都会影响模型的输入量和性能量。这是由于模型在不知道发动机哪个量变化的情况下, 只能以保持输出一致为原则来修正模型值。因此, 对 12 个量的取舍应遵循两条原则: (1) 外在的修正效果要一致, 即能使模型与发动机的输出相匹配; (2) 内在的修正也要相似, 即内在结构不出现过大的差异。根据这两条原则, 并在传感器有限的约束下, 我们选留的模型量应该是与发动机对应的输入及性能量强相关的量。

从表 2 中数据可以看出: 当发动机的 WF 、 A_8 、 CW_2 、 CW_{21} 、 T_2 分别变化 1.0% 时, 模型相应的量分别变化了 0.783%、0.954%、0.979%、0.982%、0.691%, 而其他量相对来说变化很小。因而模型中的 WF 、 A_8 、 CW_2 、 CW_{21} 、 T_2 与发动机中相应的量强相关, 而且, 模型中上述

表 2 相关性数表 (%)

		WF	A 8	ETLP	CW2	ETHP	CW21	T2	HLT	ETLT	ETHT	HHT	P2
WF	1	0.783	- 0.087	0.046	- 0.036	- 0.034	0.004	0.244	0.034	0.048	- 0.062	0.058	0.296
A 8	1	- 0.087	0.954	0.003	- 0.016	- 0.012	- 0.011	0.085	0.034	0.036	- 0.046	0.108	0.101
ETLP	1	0.053	0.005	0.480	- 0.061	- 0.040	0.035	- 0.113	0.156	0.442	- 0.021	- 0.054	- 0.061
CW2	1	- 0.032	- 0.016	- 0.061	0.979	- 0.014	0.002	0.025	0.044	0.072	- 0.021	0.060	0.033
ETHP	1	- 0.037	- 0.006	- 0.038	- 0.011	0.461	0.016	0.051	- 0.118	0.092	0.450	0.107	0.068
CW21	1	0.005	- 0.007	0.033	0.000	0.011	0.982	- 0.020	- 0.003	- 0.026	- 0.029	0.123	- 0.034
T2	1	0.247	0.084	- 0.113	0.022	0.050	- 0.018	0.691	- 0.015	- 0.014	0.036	0.048	- 0.353
HLT	1	0.029	0.030	0.160	0.043	- 0.119	- 0.002	- 0.018	0.082	0.130	- 0.112	- 0.035	- 0.046
ETLT	1	0.049	0.040	0.446	0.071	0.091	- 0.021	- 0.010	0.129	0.480	0.106	- 0.016	- 0.084
ETHT	1	- 0.069	- 0.044	- 0.014	- 0.022	0.449	- 0.022	0.038	- 0.110	0.112	0.444	0.087	0.035
HHT	1	0.053	0.105	- 0.051	0.058	0.105	0.124	0.046	- 0.033	- 0.014	0.087	0.069	0.072
P2	1	0.291	0.097	- 0.063	0.031	0.069	- 0.038	- 0.349	- 0.042	- 0.080	0.043	0.074	0.593

每一个量与发动机中其他的量不相关或相关很弱。可见这 5 个量应保留。当发动机的 *ETLP* 和 *ETHP* 分别变化 1% 时,模型的相应量分别变分了 0.480% 和 0.461%,同时模型的 *ETLT* 和 *ETHT* 也分别变化了 0.442% 和 0.450%。这说明模型的 *ETLP* 和 *ETLT* 都与发动机的 *ETLP* 相关,模型的 *ETHP* 和 *ETHT* 都与发动机的 *ETHP* 相关;当发动机的 *ETLT* 和 *ETHT* 分别变化 1% 时,有类似情况。由于这两组量与发动机对应量相关的对称性,可任意留下一组,我们选留了 *ETLP* 和 *ETHP*。当发动机的 *HHT* 和 *HLT* 变化时,可见模型中这两个量与发动机中所有量的相关都较弱,甚至与发动机本身所对应的量也是弱相关,显然这两个量不能作为模型的修正量,应舍弃。从表中可看出 *P2* 可以用 *WF* 和 *T2* 来修正,因而也可舍弃。通过分析最终选留的 7 个输入量与性能量为 *WF*、*A 8*、*ETLP*、*CW2*、*ETHP*、*CW21* 和 *T2*。

3 校正结果

当输入量及性能量选定后,用数字仿真来分析模型对发动机变化的跟踪性及算法的收敛性,以评价上述相关性分析的效果。仿真结果如图 1- 图 2 所示,其中(a)图都表示经相关性分

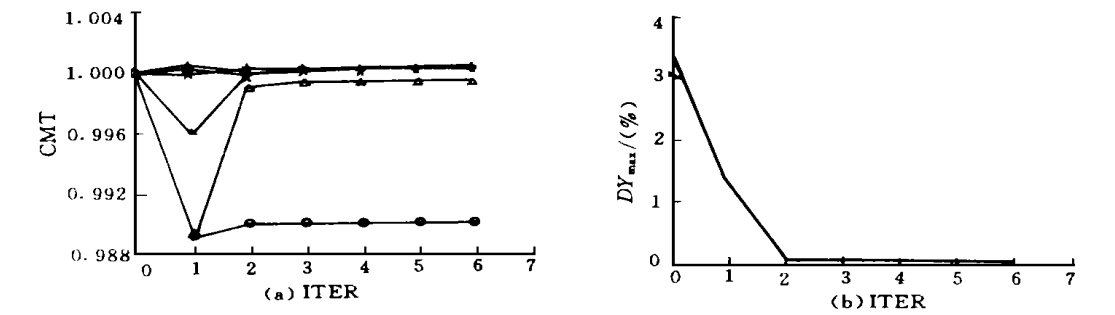


图 1 模型跟踪发动机变化的情况($WFe=0.99WF$)

析选留的模型修正量系数 *CMT* 随发动机输入量及性能量变化而变化的情况;(b)图都表示每次迭代中模型与发动机输出的最大误差 *DY_{max}*,即反映模型跟踪发动机输出的情况(图中○

WF , $\square A8$, $\triangle ETL P$, $\diamond CW2$, $\star ETH P$, $+ CW21$, $* T2$, 尾标含已表示相应的发动机设定值, $ITER$ 为迭代次数)。发动机 WF 设置为原值的 99%, 经两次迭代后, 模型中的 WF 的变化, 已经基本达到 99%, 而其他量变化较小, 且很快收敛到实际终值的 100%。此时图 1(b) 中模型输出与发动机输出的偏差也已降到允许误差范围之内, 即模型输出已与发动机输出匹配了。由此可看出模型可很好地跟踪发动机一个量的变化。实际上, 当发动机的 2 个、3 个、4 个、5 个、6 个或 7 个量都发生变化时, 模型仍能与发动机匹配。由于篇幅所限, 只给出发动机 7 个量发生变化时, 模型的跟踪情况。如图 2 所示。由仿真结果可见: 由于经相关性分析所选定的

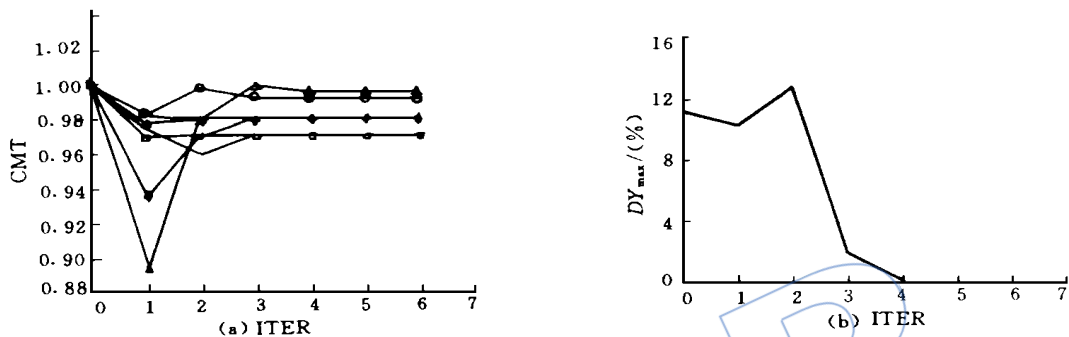


图 2 模型跟踪发动机变化的情况 ($WF_e = 0.99WF$, $A8_e = 0.97A8$, $ETLP_e = 0.99ETLP$, $CW2_e = 0.98CW2$, $ETHP_e = 0.98ETHP$, $CW21_e = 0.98CW21$, $T2_e = 0.97T2$)

这 7 个输入及性能量中的每个量都与发动机中所对应的本身量较强相关, 因而, 当这些量发生偏离时, CTF 能准确地一一跟踪。可见相关性分析是十分有效的。而且当这 7 个量之外的其他量发生偏离时, CTF 仍能进行跟踪 (由于篇幅所限不再附图)。由以上仿真实验结果可见, 经相关性分析后选留的输入量及性能量, 使 CTF 的跟踪性和收敛性都很好, 只需 2~4 次迭代运算就可以使模型跟上实际发动机的输入或性能变化, 使两者匹配, 保证机载模型有足够的精度。

4 结 论

本文首先明确了自相关性与相关性的概念, 及两者间的区别。再通过广义逆法进行相关性分析, 在此基础上选留了模型中待修正的输入量及性能量。仿真结果表明: 以此设计的发动机部件跟踪滤波器的输入及性能校正回路, 经 2~4 次迭代就能使模型与实际发动机匹配。同时, 根据本文提出的相关性概念, 不但减少了所需修正的输入量及性能量数目, 简化了算法, 而且在测量参数有限的情况下仍能显著减小机载模型的误差, 提高了机载模型的精度。

参 考 文 献

- 1 Tich EJ, etc. Performance Seeking Control for Cruise Optimization in Fighter Aircraft. AIAA- 86- 1929
- 2 Swan JA, Vizzini R W. Analytical Redundancy Design for Improved Engine Control Reliability Final Review. AIAA- 88 - 3176
- 3 Brown H, Vizzini R W. Analytical Redundancy Technology for Engine Reliability Improvement. SAE- 861725
- 4 兰春贤, 孙健国. 基于部件跟踪滤波器的解析冗余度技术. 航空动力学报, 1994, 9(3)

(责任编辑 王庆康)

A CAD SYSTEM OF SOLID ROCKET MOTOR NOZZLE

Xu Xu, Yang Li, Zhang Zhenpeng

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT

A Computer- Aided Design (CAD) system for solid rocket motor nozzle based on microcomputer is described. The developed software can accomplish a series of structure designs and performance calculations by way of man- machine interaction. At last, a number of data files, charts and engineering drawings will be outputted for further use. This software has been put into use and is proved to be with high efficiency and convenience.

Key Words Solid propellant rocket engines Jet nozzles Computer aided design

A RESEARCH ON CORRELATION OF ENGINE PERFORMANCE PARAMETERS TO INPUTS

Yu Yanglin, Sun Jianguo, Lan Chunxian

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT

A correlation analysis algorithm has been researched to find out correlation among model updates, engine inputs and its component performance. This work is required for development of an on- board real- time engine model which is based on component tracking filters, and also is significant for modern control algorithm and analytical redundancy technique to be applied to engine control. The results of numerical simulation show that the correlation analysis not only can reduce calculation work, but also enable the model developed track and match engine very well, even under the condition that the number of sensors is limited.

Key Words Correlation analysis Turbojet engines Tracking filters

AN OPTIMIZATION DESIGN APPROACH OF STATOR CONTOUR CURVES FOR DOUBLE- ACTING VANE PUMP

Ye Zhifeng and Sun Jianguo

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

ABSTRACT

Optimal control theory is applied to design of contour curves of stator transition zone for a double- acting vane pump. In order to improve characteristics of the pump, a performance index function is proposed in consideration of service life, vibration and noise. An optimal contour curve is obtained from calculation by using Pontryagin's Minimum Principle. The calculated results show that the novel contour curve can effectively decrease the shock and noise in comparison with that designed by polynomial method. It makes a vane pump run at enhanced speed and pressure. Significant improvements are also made in other aspects. Some parameters in the performance index can be adjusted to satisfy special requirements of double- acting vane pump of high performance.

Key Words Vane pumps Designing Optimal control