舰载机着舰安全的多维状态空间分析

田 瑾 赵廷弟

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191)

摘 要: 舰载机着舰过程涉及到来自人员、设备和环境等方面的众多因素,具有多变量非线性和强耦合性,对于实时有效地监控、判断着舰过程的安全状态并进行正确决策构成一定的困难. 在阐述面向安全的多维状态空间的内涵的基础上,应用多元统计分析技术提出面向安全的多维状态空间的建模和分析方法,发现系统状态表征数据所反映的过程安全特性. 以美军某型舰载机着舰过程统计数据为例,对影响机-舰系统安全状态的诸多变量的特征进行提取,建立面向着舰安全的多维状态空间模型,判定状态空间维数并确定对应的状态变量,为着舰过程的安全分析、监控和决策等提供依据,同时确保过程数据处理更为方便和简化. 案例分析结果与真实数据统计结果之间基本保持一致,证实本方法具有较强的工程实用性和可信性.

关 键 词: 系统分析; 安全工程; 着舰; 状态空间法; 主元分析

中图分类号: N 945

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)02-0155-06

Multi-dimensional state space model to aircraft-deck landing safety

TianJin Zhao Tingdi

(School of Reliability and Systems Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: There are lots of factors from human, machine and environment involved in aircraft-deck landing process, and the factors show multivariable nonlinearity and strong coupling, which brings some difficulty to real-time and effective safety monitoring, identification and decision-making to aircraft-deck landing process. To solve the problem, the principle of multi-dimensional state space to safety was expressed, and multivariable statistics analysis (MSA) was introduced to put forward a method with which the model of multi-dimensional state space to safety could be established and applied on systems analysis, so that the safety characteristics embedded in system state information could be discovered. The deck landing process of a type of USA aircraft was illustrated, characteristic variables that influence aircraft-deck landing safety were extracted based on statistical data, its multi-dimensional state space model describing aircraft-deck landing safety was established, and dimension of the space and the corresponding state variables were identified. The method supported aircraft-deck landing safety analysis, monitoring and decision-making with a reasonable and simplified data processing, and the case analysis result accorded approximately with reality, which demonstrated practicability and credibility of the method.

Key words: systems analysis; safety engineering; aircraft-deck landing; state space methods; principal component analysis (PCA)

航母舰载机进近着舰过程中影响因素复杂,需控制的参数众多,控制精度要求高,安全风险很大,特别是进近着舰的最后 20 s 是事故的多发阶段[1],据统计,约 40% 的事故发生在这一阶段,并且事故所造成的危害性后果及损失尤为严重. 因此,对舰载机着舰过程中机-舰系统安全状态的监

收稿日期: 2009-12-16

作者简介: 田 瑾(1980 -),女,四川简阳人,讲师,rabbit - tian@163.com.

控、分析和判断技术的研究和发展日益受到重视，以美国为首的军事强国已经研制并发展了适应于各种着舰条件的着舰状态实时监控系统及着舰引导安全保障系统，同时发布了 NAVAIR 00-80T-105 等航空保障操作手册[2-3]，旨在确保安全的前提下完成航母的航空保障任务. 然而舰载机着舰安全事故仍时有发生(甚至在 2003 年后，美军的 F/A-18，S-3B，F/A-18C 等型号飞机和俄罗斯的 SU-33 型飞机还发生过不同程度的着舰安全事故[4])，这对于已拥有及即将拥有航空母舰的世界各国构成了强大的技术挑战. 如何及时、准确地分析和判断舰载机着舰的安全性，及时采取纠正措施和安全保障手段将风险降至最低，是提高舰载机着舰安全水平所要解决的关键技术问题之一.

状态空间分析是现代控制理论进行描述、分析和设计的工具，状态空间分析方法用于系统预测，能从一定深度上揭示系统运动的规律和机制，较全面地反映系统各种因素和变量之间的相互联系[5]. 舰载机着舰回收作业涉及到来自人员(如飞行员、着舰引导员、舰面保障人员等)、设备(如舰载机、甲板、各种着舰引导装置和舰面保障装置等)以及环境(如气象、海况等)等多种因素，以上诸多因素在舰载机着舰过程中相互关联，其综合影响决定了机-舰系统状态，因此舰载机着舰过程通常体现出多变量、非线性和强耦合性的特征. 将该过程进行中系统状态的多个变量的综合影响以多维状态数据空间的形式来表达，采用状态空间方法进行分析，可以更全面、直观和有效地描述过程进行中系统状态的变化、发现异常和危险. 过程状态空间可采用机理分析和多元统计分析确定，从机理分析获得系统多变量关系，拓展性和准确性较好，但是对于舰载机着舰这样的复杂过程，其机理获取难度极大. 而多变量统计分析方法将过程变量投影到低维数据空间，实现降维，其中主元分析方法在数据降维和聚类中得到了广泛的应用.

针对上述问题，本文基于多元统计理论提出了一种面向安全的多维状态空间分析方法，该方法综合考虑了刻画舰载机着舰状态的多种特征变量(如机-舰的空间相对位移、相对速度和角速度、角度等)，在有统计样本作为分析基础数据的情况下，建立多维状态空间模型，获取各变量综合影响所反映出的数值规律；进一步地，通过分析系统状态安全与危险 2 类情况分别对应的数值规律，提出对系统状态安全与否进行判别的方法.

1 多维状态空间建模分析方法

1.1 面向安全的多维状态空间

由系统安全性工程原理可知，危险的发生是由于来自人员、设备和环境等方面的诸多因素交互作用和综合影响所致，这些因素的变化规律、运动方式和影响能力体现在若干工程变量(例如位移、速度、角度等)中，而这些变量在大多数情况下彼此呈非线性相关关系. 若找出这些变量对危险事件的综合作用的规律，则可以此为依据分析待判状态的安全特性.

根据控制理论中对状态空间分析的定义[5-6]建立面向安全的多维状态空间模型如图 1 所示[7]. 假定系统状态变量有 n 个，记为 x_1，x_2，…，x_n，把系统状态变量看作向量 $\boldsymbol{X}$ 的分量，称 $\boldsymbol{X}$ 为 n 维状态向量，记为 $\boldsymbol{X}=[x_1\ x_2\cdots\ x_n]^{\mathrm{T}}$. 时间总是独立的，在状态空间中独占一维，给定 $t=t_0$ 时初始状态向量 $\boldsymbol{X}(t_0)$ 及 $t\geqslant t_0$ 的输入向量，则 $t\geqslant t_0$ 的系统状态可由状态向量 $\boldsymbol{X}(t)$ 唯一确定. 以状态变量作为坐标轴所组成的空间称为状态空间，系统在任一时刻的状态，都能用状态空间中的一个点来表示，系统状态随时间的变化过程，在状态空间中表示为一条轨迹，即为系统运行轨迹.

将系统状态空间划分为安全状态空间和非安全状态空间两部分，系统的安全状态构成的空间即为系统状态空间中的安全状态空间，剩余空间即为非安全状态空间. 安全边界是安全状态空间和非安全状态空间的界线，也是安全控制的分水岭. 从状态空间中的一个初始位置 x_0 开始，系统轨迹在状态空间中穿越，最终到达 x_s 点，整个过程中系统状态到安全边界的距离是不断变化的. 当系统运行轨迹超出了安全边界，则事故发生.

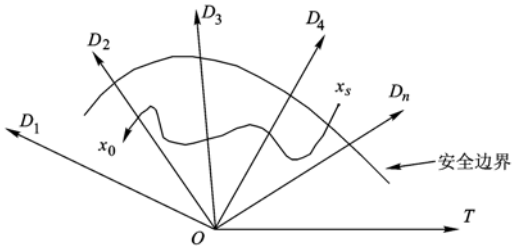


图 1 面向安全的多维状态空间模型示意图

面向安全的多维状态空间模型能够抽象地反映过程进行中系统内多因素之间的相互联系，从一定深度上表示系统状态由正常到异常的变化规律，揭示危险事件发生、发展的机理. 在具体的建模方法上，本文应用多元统计方法对过程降维，在确定状态空间的同时获取和约减独立变量.

1.2　建模方法

状态空间的确定至少包括两个内容:空间维数及各维含义确定,以及对应的过程描述变量的获取. 既然舰载机着舰这样的复杂过程所涉及的众多变量之间有一定的相关性,就必然存在着起支配作用的共同因素,称为主元. 由于主元的性质决定了其为多个特征变量在着舰过程中综合作用的集中体现,并且彼此互不相关,不妨通过确定主元的方式来建立面向安全的多维状态空间. 这样一方面体现了多因素交互作用及综合影响的含义,另一方面主元彼此的独立性为建立状态空间模型提供了必要的理论支持. 转化得到的主元可根据精度要求和累积贡献率进行取舍,因此主元数量可以在少于原始变量的前提下尽可能多地包含原始变量所反映的信息,从而使问题得到简化,也为从大量的数据中提取机理特征提供可能.

面向安全的多维状态空间建模分析框架如图 2 所示.

首先确定可反映舰载机着舰过程状态的特征变量,运用矩阵变换算法从中提取若干综合变量,描述多因素综合影响的规律,建立着舰过程状态空间模型,通过对各变量在主元中所占比重的排序,以影响较大的变量的组合变量作为状态空间的维,确定状态空间的维的含义.

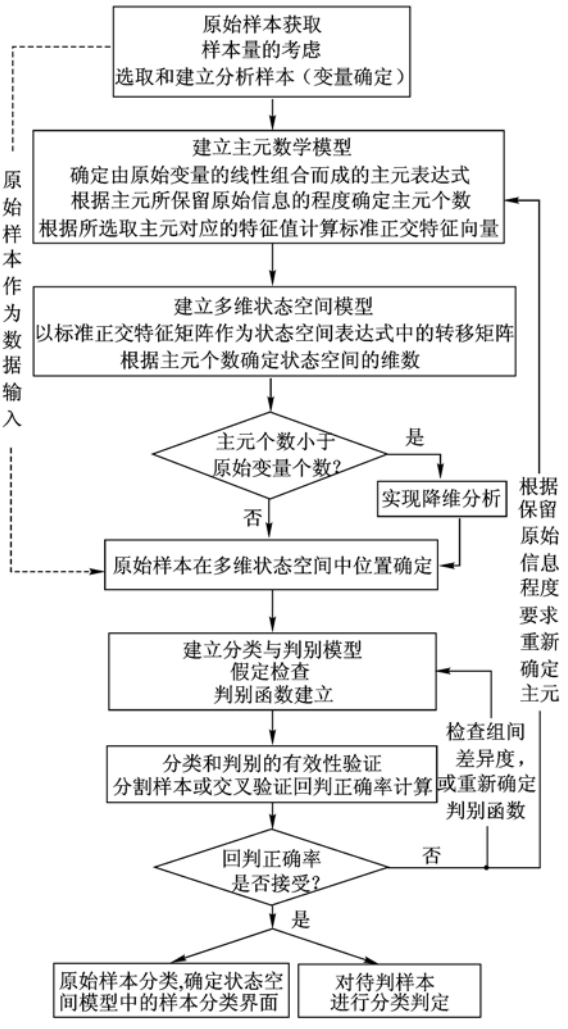


图 2　面向安全的多维状态空间建模分析框架

其次将着舰过程样本数据在所建状态空间中进行表述,并描述实际变量在状态空间中所对应的位置.

最后利用分类和判别分析进行空间区域划分(如安全和异常两类),并对划分的有效性进行验证,以区域划分结果为准则,判断新的样本所属的状态.

2　研究案例

2.1　特征变量确定及数据预处理

对舰载机着舰过程安全进行监控和分析,需要利用特征变量进行系统状态异常监测,在确定当前系统安全风险偏离阈值之后,分析和确定状态异常的原因,又由于并非所有的特征变量都能够反映着舰状态的安全与否,因此,用于异常检测的特征变量集合的确定尤为关键. 本文着重针对舰载机着舰过程中可能发生的碰撞事故(包括与飞行甲板、着舰跑道之外的舰上设备或其他舰载机相撞)、阻拦索在受到过大冲量下可能发生的断裂事故、未能成功挂索情况下复飞失败的事故进行研究,故选取运动学特征变量作为系统安全状态监测和分析的特征变量.

所采集的原始特征变量个数 $p=14$,分别为甲板风速(V_{W})、母舰甲板俯仰角(δ_{Dp})、母舰甲板滚转角(δ_{Dr})、舰载机接触甲板时相对甲板的水平速度(V_{E})、舰载机接触甲板时起落架平均沉降速度(V_{VA})、舰载机接触甲板时的下滑角(β_{VV})、舰载机接触甲板时的俯仰角(θ_{pTD})、舰载机接触甲板时的滚转角(θ_{rTD})、舰载机接触甲板时的俯仰角速度($\dot{\theta}_{pTD}$)、舰载机接触甲板时的滚转角速度($\dot{\theta}_{\mathrm{rTD}}$)、舰载机接触甲板时的航迹角(*F. P. A*)、舰载机接触甲板时偏离甲板中线的距离(Y)、舰载机与甲板的接触点与舰艉的距离(X_{W})和钩住的拦阻索编号(W_{r}).

以美军 F-14A 型机在“企业号”CVN-65 航母昼间着舰过程中舰载机接触甲板时刻的数据样本[8]作为分析输入,样本量 $m=150$,即 150 个架次舰载机分别在接触甲板时刻采集到的以上 14 个变量的指标,共得到 $m\times p=2\,100$ 个数据. 由样本数据求得原始变量的相关矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}
1.000 & 0.004 & 0.099 & -0.537 & -0.323 & -0.251 & 0.334 & -0.003 & 0.110 & 0.101 & -0.074 & -0.066 & -0.189 & -0.183\\
0.004 & 1.000 & 0.128 & -0.032 & -0.055 & 0.154 & 0.049 & 0.252 & -0.054 & 0.057 & 0.032 & 0.154 & -0.028 & -0.033\\
0.099 & 0.128 & 1.000 & -0.006 & -0.126 & -0.100 & 0.045 & 0.177 & -0.032 & 0.180 & -0.279 & 0.252 & 0.022 & 0.053\\
-0.537 & -0.032 & -0.006 & 1.000 & 0.005 & -0.154 & -0.374 & 0.090 & -0.017 & -0.109 & 0.132 & 0.036 & 0.134 & 0.079\\
-0.323 & -0.055 & -0.126 & 0.005 & 1.000 & 0.915 & -0.241 & -0.096 & -0.184 & -0.126 & -0.039 & -0.067 & 0.088 & 0.157\\
-0.251 & 1.54 & -0.100 & -0.154 & 0.915 & 1.000 & -0.135 & -0.073 & -0.213 & -0.052 & -0.039 & -0.045 & 0.041 & 0.114\\
0.334 & 0.049 & 0.045 & -0.374 & -0.241 & -0.135 & 1.000 & -0.049 & -0.008 & 0.106 & 0.036 & -0.324 & -0.576 & -0.218\\
-0.003 & 0.252 & 0.177 & 0.090 & -0.096 & -0.073 & -0.049 & 1.000 & 0.125 & -0.192 & 0.027 & 0.405 & -0.032 & 0.47\\
0.110 & -0.054 & -0.032 & -0.017 & -0.184 & -0.213 & -0.008 & 0.125 & 1.000 & -0.051 & -0.225 & -0.048 & -0.412 & -0.099\\
0.101 & 0.057 & 0.180 & -0.109 & -0.126 & -0.052 & 0.106 & -0.192 & -0.051 & 1.000 & 0.221 & 0.17 & 0.002 & 0.078\\
-0.074 & 0.032 & -0.279 & 0.132 & -0.039 & -0.039 & 0.036 & 0.027 & -0.225 & 0.221 & 1.000 & -0.185 & -0.023 & -0.001\\
-0.066 & 0.154 & 0.252 & 0.036 & -0.067 & -0.045 & -0.324 & 0.405 & -0.048 & 0.017 & -0.185 & 1.000 & 0.397 & 0.143\\
-0.189 & -0.028 & 0.022 & 0.134 & 0.088 & 0.041 & -0.576 & -0.032 & -0.412 & 0.002 & -0.023 & 0.397 & 1.000 & 0.296\\
-0.183 & -0.033 & 0.053 & 0.079 & 0.157 & 0.114 & -0.218 & 0.047 & -0.099 & 0.078 & -0.001 & 0.143 & 0.296 & 1.000
\end{bmatrix} \tag{1}$$

2.2 主元求解及选取

由于主元的几何意义决定其方向实际上是样本相关矩阵 $\boldsymbol{R}$ 的特征向量的方向,且主元的方差贡献等于 $\boldsymbol{R}$ 的相应的特征值,因此,利用样本数据求解主元的过程实际上就转化为求相关矩阵或协方差阵的特征值和特征向量的过程[9]. 本例中,由于各变量的量纲不一致且差异较大,因此由相关矩阵而非协方差矩阵出发求解主元,得到结果如表1和图3所示.

表1 主元求解结果

主元排序	特征值	主元方差贡献率/%	累积贡献率/%
1	2.680	19.145	19.145
2	2.047	14.620	33.765
3	1.612	11.517	45.282
4	1.468	10.485	55.767
5	1.275	9.108	64.875
6	1.036	7.400	72.276
7	0.907	6.475	78.751
8	0.807	5.767	84.518
9	0.708	5.060	89.578
10	0.532	3.802	93.380
11	0.344	2.461	95.841
12	0.324	2.311	98.152
13	0.212	1.513	99.665
14	0.047	0.335	100.000

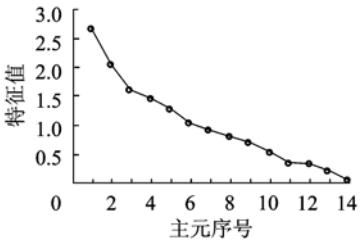


图3 主元特征值碎石图

可以看出,14个主元特征值中,虽然前6个大于1,但其累积贡献率仅达到72.276%,如舍弃其余8个主元,信息缺失较严重;并且由图3可见,14个主元的主元特征值变化的趋势持续走低,并未在某处呈现明显的平稳趋势,因此,考虑到工程上通常将累积贡献率的门限值定为85%[9],本文保留前9个主元,以确保所选取主元的累积贡献率达到一般工程要求(如对主元所反映原始变量的的精确度有特别要求,则以满足该要求为准).

计算结果还显示主元对原始变量信息的保留程度,如表2所示,除了变量 V_w,Y 和 θ_{pTD} 信息损失稍大之外,主元几乎包含了各个原始变量至少85%的信息.

表2 主元对原始变量信息的保留程度计算结果

原始变量	主元对原始变量信息的保留程度/%
V_w	75.8
δ_{Dp}	99.4
δ_{Dr}	86.9
V_E	85.5
V_{VA}	95.9
β_{VV}	97.3
θ_{pTD}	83.0
θ_{rTD}	90.2
$\dot{\theta}_{pTD}$	94.2
$\dot{\theta}_{rTD}$	92.8
F. P. A	88.7
Y	77.4
X_W	87.7
W_r	99.3

2.3 多维状态空间模型建立

舰载机的着舰过程是多变量、非线性的,将过程多个变量在多维状态空间里进行描述,采用状态空间方法分析可以更全面、直观和有效地描述过程状态的变化. 由于分析得到的主元彼此相互

独立,因此以其对机 – 舰系统建立多维状态空间模型.

根据与所选 9 个特征值对应的标准正交特征向量求解结果,设原始向量为 $\boldsymbol{U}=[V_{\mathrm{W}},\delta_{\mathrm{Dp}},\delta_{\mathrm{Dr}},V_{\mathrm{E}},V_{\mathrm{VA}},\beta_{\mathrm{V}},\theta_{\mathrm{pTD}},\theta_{\mathrm{rTD}},\dot{\theta}_{\mathrm{pTD}},\dot{\theta}_{\mathrm{rTD}},\mathrm{F.\ P.\ A},Y,X_{\mathrm{W}},W_{\mathrm{r}}]^{\mathrm{T}}$,主元向量为 $\boldsymbol{W}=[W_1,W_2,W_3,W_4,W_5,W_6,W_7,W_8,W_9]^{\mathrm{T}}$,则舰载机接触甲板时刻机-舰系统的多维状态空间模型表示为

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}-0.242 & 0.0070 & -0.028 & 0.153 & 0.241 & 0.209 & -0.263 & 0.017 & -0.138 & -0.056 & 0.006 & 0.121 & 0.237 & 0.161\\ 0023 & 0.086 & 0.223 & 0.125 & -0.293 & -0.297 & -0.144 & 0.252 & 0.062 & 0.009 & -0.093 & 0.331 & 0.172 & 0.068\\ 0.201 & 0.255 & 0.268 & -0.367 & 0.212 & 0.313 & 0.111 & 0.169 & -0.02 & 0.004 & -0.283 & 0.205 & -0.038 & 0.022\\ 0.162 & 0.024 & 0.094 & -0.184 & -0.101 & -0.046 & 0.069 & -0.228 & -0.414 & 0.454 & 0.26 & 0.028 & 0.27 & 0.157\\ -0.17 & 0.502 & -0.045 & 0.182 & -0.002 & 0.092 & 0.162 & 0.373 & -0.11 & 0.087 & 0.465 & -0.007 & -0.217 & -0.106\\ -0.302 & -0.012 & 0.484 & 0.284 & 0.081 & 0.054 & 0.054 & -0.179 & 0.287 & 0.501 & -0.158 & -0.141 & -0.288 & 0.232\\ 0.174 & -0.11 & -0.393 & -0.261 & 0.049 & 0.042 & -0.14 & 0.251 & 0.507 & 0.223 & 0.266 & 0.099 & -0.075 & 0.599\\ -0.065 & -0.309 & 0.228 & 0.053 & -0.016 & -0.1 & 0.467 & 0.284 & -0.39 & -0.421 & 0.0090 & -0.181 & -0.126 & 0.63\\ 0.052 & -0.756 & 0.257 & -0.004 & 0.262 & 0.11 & -0.011 & 0.405 & -0.048 & 0.215 & 0.343 & 0.303 & -0.128 & -0.452\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{U} \tag{2}$$

可见根据样本数据的差异性分析系统状态所表现出的规律确定维度(所确定的主元个数 q 即为空间的维度),建立多维状态空间模型,样本越接近真实,样本量 m 越大,所建模型反映出的系统特性和规律越接近于工程实际.

2.4　系统安全状态判别分析及模型验证

为了检验多维状态空间模型的正确性,根据多元判别分析原理[10],将样本数据回代入状态空间表达式,得到 m 个 q 维数组. 由于每个数组对应所建状态空间模型中的一个确定的点,这样就得到 m 个点,在状态空间模型中可以分别表示出来,为实现后续的状态空间中安全/危险区域划分提供基础. 若将待分析的系统状态所对应的数据转换为状态空间中相应的点,可分别对该点与安全/危险区域重心的距离进行比较,确定待分析状态的安全特性.

由于舰载机着舰事故多表现为挂索失败(包括未能挂索或拦阻索意外断裂)引起舰载机失去控制而最终导致的碰撞、爆炸和火灾等情况,因此本例中假设以“挂索成功”和“挂索失败”两种情况对 150 组样本所表示的系统安全状态进行分类(分别以分类变量 s 和 f 来表示). 由原始样本数据可直观得到“挂索成功”和“挂索失败”两种情况分别有 106 次和 44 次. 为了检验所建立的安全多维状态空间模型对系统状态判定的有效性和准确性,将 $m=150$ 个 14 维的原始变量回代入状态空间表达式式(2),分别利用工程上广泛使用的两种判别方式来判断该 150 组样本的所属类别,并与真实分类情况进行比较,得到分类判别验证结果如表 3 所示. 其中原始数据验证是用从全部数据得到的判别函数来判断每一组样本的结果;而交叉验证是对每一组样本都用除去该组样本的其余样本数据所得到的判别函数来判断.

由表 3 可知,用原始数据验证和交叉验证方式进行分类的正确率分别达到 98.0% 和 97.3%,结果表明,利用样本数据建立的舰载机着舰安全多维状态空间模型对于原始观测的分类判断正确率较高,拟合准确性较强,说明该模型能够在一定程度上反映机-舰系统安全状态表现与其本质规律之间的联系,可用于对待判数据样本所表示的系统状态是否安全进行判别.

表 3　着舰安全多维状态空间模型的判别验证结果

验证方式		安全/危险实际分类	安全/危险状态预测结果		
			挂索失败	挂索成功	合计
原始数据验证	次数	挂索失败	44	0	44
		挂索成功	3	103	106
	百分比/%	挂索失败	100.0	0	100.0
		挂索成功	2.8	97.2	100.0
交叉验证	次数	挂索失败	44	0	44
		挂索成功	4	102	106
	百分比/%	挂索失败	100.0	0	100.0
		挂索成功	3.8	96.2	100.0

计算可得 Fisher 线性判别式函数系数,由此建立用于判别待判样本所属类型的数学模型

$$\begin{bmatrix}f\\ s\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-3.300 & -1.684\\ 3.568 & 4.084\\ -11.041 & -11.122\\ -0.744 & 0.160\\ -7.283 & -7.825\\ 1.961 & 3.786\\ -4.942 & -1.407\\ 1.985 & 5.325\\ 7.178 & 4.777\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{W}_0+\begin{bmatrix}-126.194\\ -123.324\end{bmatrix} \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{W}_0$ 为待判样本数据 $\boldsymbol{U}_0$ 在多维状态空间中的表示.

假定 $\boldsymbol{U}_0 = [17.0, -0.20, -0.70, 55.0, 2.80, 2.30, 8.50, -0.30, 6.80, 0.90, -2.80, -4.0, 48.0, 0]^{\mathrm{T}}$,代入式(2)求得 $\boldsymbol{W}_0$,再将 $\boldsymbol{W}_0$ 代入式(3),计算得到 $\begin{bmatrix} f \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 94.3355 \\ 91.3168 \end{bmatrix}$. 根据判别分析的原理[10],比较 s 和 f 两类计算结果,将待判样本划分到结果值较大的一类即“挂索失败”类别中去,由前述模型验证结果可知,该分类结果的可信度在 97.3% 以上.

3 结 束 语

本文将多元统计方法和舰载机着舰过程的工程机理分析相结合,提出了从非线性相关的多变量统计数据中提炼舰载机着舰过程特征并以此为基础进行机-舰系统安全状态监控和判断的方法. 该方法具有一定的通用性,可推广用于其他产品研制和使用过程的监控及分析.

本文以美军舰载机着舰数据为例,确定了着舰过程多变量对应的安全状态空间,包括空间的维数和空间的工程含义. 从案例中着舰安全多维状态空间的分析计算结果与系统真实状态的对比来看,基于主元分析的安全特征提取及判别算法对于舰载机着舰这样的非线性过程系统的描述准确性较高,兼具较强的工程实用性.

参考文献 (References)

[1] 史青海. 舰载机着舰控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2006
Shi Qinghai. Study on control technology for carrier aircraft landing research on carrier landing technology[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2006 (in Chinese)

[2] Chief of NAVAL operations CV NATOPS manual[R]. NAVAIR 00-80T-105, 0800LP0291740, 1999

[3] Thomas Rudowsy, Stephen Cook, Melvin Luter, et al. Review of the carrier approach criteria for carrier-based aircraft phase I: final report[R]. NAWCADPAX/TR-2002/71, 2002

[4] Aircraft Carriers-CV/CVN [EB/OL]. [2009-12-23]. http://navysite.de/carriers.htm

[5] Tripathi S M. Modern control systems: an introduction[M]. Hingham, MA: Infinity Science Press, 2008: 2 - 57

[6] Zdzislaw Bubnicki. Modern control theory[M]. Berlin: Springer, 2005: 17 - 37

[7] 戎梅. 系统事故推演建模与分析方法研究[D]. 北京:北京航空航天大学工程系统工程系,2009
Rong Mei. Research on system accident rehearsal modeling and analysis method[D]. Beijing: Deportment of System Engineering of Engineering Technology, Beijing University of Aeronautics and Astron autics, 2009 (in Chinese)

[8] Richard P Micklos. Carrier landing parameters from survey 45, fleet and training command aircraft landing aboard USS enterprise CVN-65 (main text and appendix A) [R]. AD-A258873, 1991

[9] 张立军,任英华. 多元统计分析实验[M]. 北京:中国统计出版社,2009: 72 - 90
Zhang Lijun, Ren Yinghua. Multivariate statistical analysis experiment[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009: 72 - 90 (in Chinese)

[10] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京:中国人民大学出版社,2004: 98 - 113
He Xiaoqun. Multivariate statistical analysis[M]. Beijing: China Renmin University, 2004: 98 - 113 (in Chinese)

(编 辑:董立君)

(上接第 154 页)

[27] Kapur P K, Goswami D N, Amit B, et al. Flexible software reliability growth model with testing effort dependent learning process[J]. Applied Mathematical Modeling, 2008, 32: 1298 - 1307

[28] Kapur P K, Grover P S. Modelling an imperfect debugging phenomenon with testing effort [C]//Proceedings of the 4th Software Reliability Engineering. Los Alamitos: IEEE, 1994: 178 - 183

[29] Kapur P K, Omar S, Anu G A, et al. Unified framework for developing testing effort dependent software reliability growth models [J]. WSEAS Transactions on Systems, 2009, 4 (8): 521 - 531

[30] Yamada S, Ohba M, Osaki S. S-shaped software reliability growth models and their applications [J]. IEEE Trans on Reliability, 1984, R-33 (4): 289 - 292

[31] Ohba M. Inflection S-shaped software reliability growth models [M]. Stochastic Models in Reliability Theory. Berlin: Springer, 1984: 144 - 162

[32] Su Y S, Huang C Y. Neural-network-based approaches for software reliability estimation using dynamic weighted combinational models[J]. The Journal of Systems and Software, 2007, 80: 606 - 615

[33] Yamada S, Tokuno K, Osaki S. Imperfect debugging models with fault introduction rate for software reliability assessment[J]. International Journal of Systems Science, 1992, 23 (12): 2241 - 2252

(编 辑:娄 嘉)