

基于任务段的航空发动机载荷谱聚类方法

杜宇飞, 孙志刚, 陆 琪, 宋迎东
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对航空发动机飞行任务剖面分类问题,对发动机 31 个飞行任务剖面进行了聚类分析。选取飞行高度和飞行马赫数作为划分飞行任务剖面的参数,依据其对应的飞行任务段均值生成聚类散点图,将剖面类型划分为 5 大类。结果表明:低空低速剖面在无量纲飞行高度为 0~0.2、飞行马赫数为 0.4~0.6 区间,均值最低;高空高速剖面在无量纲飞行高度为 1.2~2.2、飞行马赫数为 1.0~1.8 区间,均值最高;飞行任务剖面在无量纲飞行高度为 0.2~1.2、飞行马赫数为 0.6~1.0 区间内最为集中;针对散点密集区域,可依据剖面特征进一步划分剖面类型;不同剖面间,飞行高度与飞行马赫数差异性大,利于剖面划分,而法向过载与转速差异性小,不利于剖面的划分。所提出的方法可以快速有效的对航空发动机飞行任务剖面进行聚类分析。

关 键 词: 航空发动机载荷谱; 任务段; 飞行任务剖面; 聚类分析; 聚类散点图

中图分类号: V231.91 **文献标志码:** A

Aeroengine load spectrum clustering method based on mission segment

DU Yufei, SUN Zhigang, LU Qi, SONG Yingdong
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the classification problem of aeroengine mission profile, 31 flight mission profiles of a fighter engine were clustered. The flight altitude and flight Mach number were selected as the parameters of the flight mission profile, and the cluster scatter plot was generated according to the corresponding flight mission segment average, and the profile types were divided into five categories. Results showed that the low-altitude low-speed profile had the lowest mean value at the dimensionless flight altitude of 0—0.2 and the flight Mach number of 0.4—0.6. The high-altitude high-speed profile had the highest mean value at the dimensionless flight altitude of 1.2—2.2 and the flight Mach number of 1.0—1.8, with the flight mission profile. The dimensionless flight altitude was 0.2—1.2, and the flight Mach number was 0.6—1.0. The contour was further divided according to the profile characteristics; the difference between the flight height and the flight Mach number was different between different sections, which was beneficial to the section division. The difference between normal overload and speed was small, which was not conducive to the division of the profile. The proposed method can quickly and effectively cluster the aeronautical engine mis-

收稿日期: 2018-04-19
基金项目: 国家自然科学基金(51675266); 中央高校基本科研专项基金(NJ20160038, NS2017011);
南京航空航天大学基金(kfjj20160203, kfjj20170220)
作者简介: 杜宇飞(1992—),男,助理工程师,硕士,主要从事结构强度方向研究。

引用格式: 杜宇飞,孙志刚,陆琪,等. 基于任务段的航空发动机载荷谱聚类方法[J]. 航空动力学报,2019,34(5):987-996. DU Yufei, SUN Zhigang, LU Qi, et al. Aeroengine load spectrum clustering method based on mission segment[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(5):987-996.

sion profile.

Key words: aeroengine load spectrum; mission segment; flight mission profile; cluster analysis; clustering scatter plot

航空发动机载荷谱是航空发动机及其零部件定寿、延寿的重要依据^[1-4]。其中,航空发动机载荷谱所对应的飞行任务剖面包含了发动机的飞行信息,是飞机在实际飞行时所产生的具体数据,反映了发动机的实际使用状况。

然而,飞行任务剖面由于数量众多,杂乱无序^[5-6],难以找到相似剖面的规律性,分类问题迄今为止并未能得到很好的解决。针对此问题,就需要提及聚类的问题。“人以群分,物以类聚”,聚类是一个古老的问题,它伴随着人类社会的产生和发展而不断深化,人类要认识世界必须区别不同的事物并认识事物间的相似性。聚类分析根据“物以类聚”的思想,对样本进行多元统计分析,目的在于将相似的事物归类,将样本划分成有意义或有用的类,它的原则是同一类中的个体有较大的相似性,而不同类的个体差异性则很大。飞行任务剖面聚类后,易于确定典型任务剖面,大大减少了需要分析的样本量,节省了时间成本,从而可以减少飞行试验次数;对新机和在役机种,利用能反映发动机载荷使用特点的典型任务剖面进行寿命设计和考核将显著减少后续载荷分析工作^[7],并可以运用于日常维护,飞行任务和事故分析,对发动机进行结构分析及寿命评定提供基础,还可以对飞行任务剖面的编制和预测提供很大的帮助,在实际工程中具有重大意义。

文献[8]采用剖面参数范围相似的原则进行分类,是 1 种经验的方法,在工程应用中较难操作。文献[9-12]均采用模糊聚类的分析方法,文献[9]用模糊聚类的方法选取飞行高度、飞行马赫数和发动机转速等 3 个参数对飞行任务剖面进行了划分,文献[10]采用模糊聚类算法应用于路面识别。文献[11]应用于互联系统。文献[12]应用于地表温度差。这种方法对初始化参数特别敏感,容易陷入局部最小值。文献[13-14]均采用层次聚类的方法。文献[13]利用层次聚类的方法,采用最短距离法作为载荷以及载荷位移的聚类依据,提供了一种基于聚类分析桥架起重机整机载荷谱编制方法。文献[14]用系统聚类的方法对市场索赔数据进行分析,并绘制了聚类树形图。同时系统聚类也叫多层次聚类。层次聚类的方法计算复杂度太高,奇异值也能产生很大影响,算法很

可能聚类成链状。

文献[15-16]采用的是主成分聚类法。文献[15]提出了利用主成分分析对航空发动机飞行任务剖面进行分类的方法,并对某战斗机发动机 18 个飞行任务剖面进行了聚类分析。先利用主成分分析法选取了飞行高度、飞行马赫数、发动机转速以及发动机重心法向过载等 4 个参数作为分类的重要参数。后利用层次聚类法中的重心法形成树状图形进行相应的聚类分析。文献[16]利用主成分分析法选取重心法向过载、飞行速度、俯仰角速度、飞行高度和飞机质量 5 个对法向过载影响最灵敏的飞行参数作为某飞机飞行任务剖面分类的原始依据参数,之后也利用重心法进行定量的聚类。主成分聚类法,即先进行主成分分析,后聚类分析。其中,主成分分析方法是寻找一些综合指标(原单项指标的线性组合),用以分析具有一定相关程度的多指标数据的一种统计分析方法。而聚类分析方法就是根据一批样本的多个观测指标,具体找出能够度量样本或指标之间相似性较大的样本聚合为一类,将另外一些相似性较大的聚为另一类。因此用主成分聚类法对飞行任务剖面的合并,先采用主成分分析方法将飞行任务剖面中多指标尽可能的压缩、降维,然后再用聚类分析方法根据主成分分析法确定出来的新指标对飞行任务剖面进行聚类。但上述文献最后均通过层次聚类的重心法进行定量的聚类,在编程中较为烦琐,不利于进行批量处理。国外基于飞行任务剖面聚类的文献由于保密相关,难以查阅。

总的来说,单纯的聚类分析方法在样本量较大时,要获得聚类结论有一定难度。主要因为相似系数是根据被试的反映来建立反映被试间内在联系的指标,而实践中有时尽管从被试反映所得出的数据中发现他们之间有紧密的关系,但事物之间却无任何内在联系,此时,如果根据距离或相似系数得出聚类分析的结果,显然是不恰当的,但是,聚类分析模型本身却无法识别这类错误。

本文在主成分分析与 K-means 聚类分析方法相结合的基础上,加入了依据飞行剖面中的高度参数进行划分的方法,易于通过编程实现,划分较为方便且准确,并实现了批量处理任务剖面。从而避免了编程烦琐,以及依据传统聚类方法仅

根据距离或相似系数划分不准确及对初始化参数特别敏感的问题。即在文献[8]基础上,基于主成分分析法选出的飞行高度、飞行马赫数、发动机转速及发动机重心法向过载等 4 个参数,选取了高度为主要划分参数,马赫数参数为辅,后利用 K-means 聚类思想^[17-19]将发动机 31 个飞行剖面的飞行高度和马赫数求均值后形成聚类散点图,并依据散点分布距离远近进行了初步划分,最后依据剖面特征对散点密集区域进行了进一步的划

分。此聚类分析方法是与相关专家讨论后,进一步总结而来。

本文基于任务段的聚类分析方法选取了典型飞行任务剖面,可方便统计飞行任务混频。为综合任务谱、长期试车谱及加速任务试车谱的编制和发动机各部件应力分析奠定了基础,并减少了分析的任务量。

图 1 是飞行任务剖面划分流程框图,图中的 H 、 Ma 分别为无量纲飞行高度、飞行马赫数。

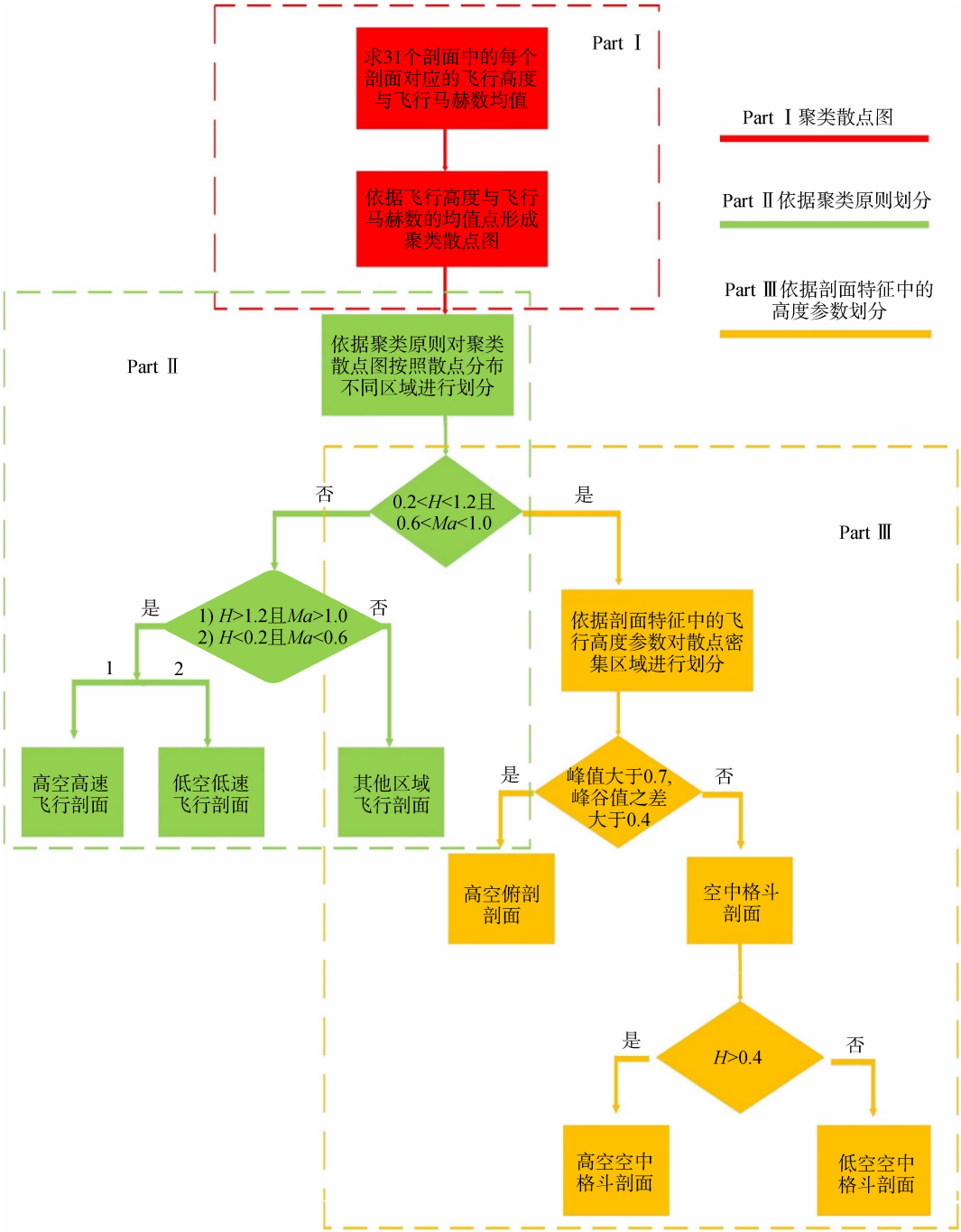


图 1 飞行任务剖面划分流程框图

Fig. 1 Flight mission profile division process block diagram

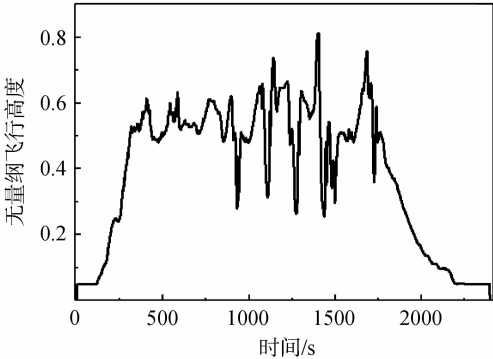
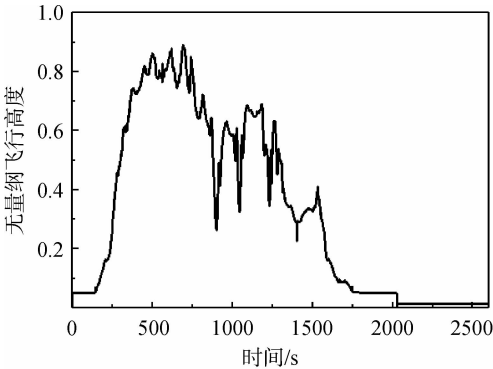
1 划分参数的选取

聚类分析中如果参与聚类的变量的量纲不同会导致错误的聚类结果。因此在聚类过程进行之前必须对变量值进行标准归一化,即消除量纲的影响。所以文中出现的参数均为无量纲参数。

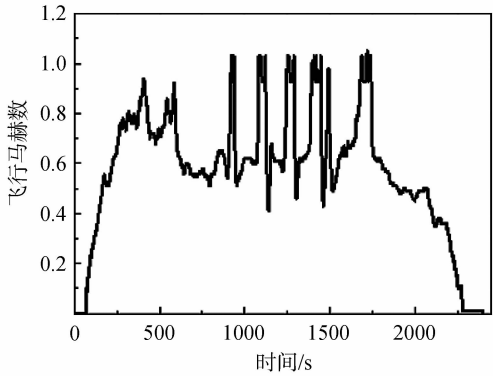
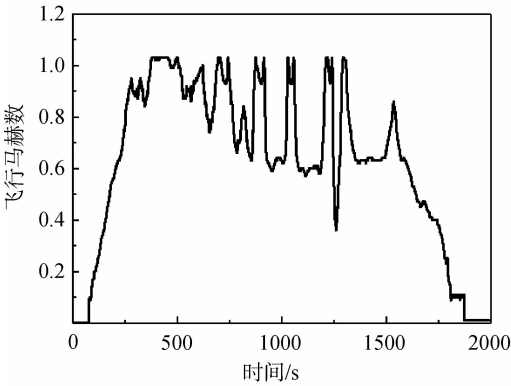
应力分析结果表明,航空发动机载荷谱最重要的参数是转速谱和温度谱,而本文将飞行高度、飞行马赫数作为重要参数,是因为本文是基于整机载荷谱角度来进行分析的,且本文目的在于统计任务混频,从而为综合任务谱、长期试车谱及加速任务试车谱的编制和发动机各部件应力分析奠定基础。因此本文只是针对初步的分类阶段来进行论述。在后期的各部件应力分析时,再从先前依据飞行高度、飞行马赫数所划分出的不同飞行剖面中选取相应的机械载荷谱(转速、温度等)参数,来探究不同剖面间所对应的损伤规律,从而对各部件进行应力分析。

在对实际飞行任务剖面进行分类的时候,发

现发动机的转速谱基本趋于平稳,大的波动很少,发动机过载谱则大都集中于中间区域,有大的波动,规律性则不强。只有高度谱和马赫数谱有大的波动,且不同时刻波动大小不同,即差异性强,便于划分,其中由于高度谱的幅值较马赫数谱要大的多,波动差值更大,随机性更强,从而更加易于划分。所以选取高度参数为主,马赫数参数为辅来生成聚类散点图进行初步划分。同时飞行高度参数可以直观的反映整机载荷谱的剖面信息,且从图中可看出同一剖面中飞行马赫数参数,转速参数,过载系数参数均随飞行高度参数的变化而变化,这些参数与高度参数均具有相关性,并且此特点在文献[15]的飞行任务剖面参数的相关系数矩阵中也有体现。即依据高度参数选取的相似剖面,马赫数参数,转速参数以及过载系数参数也都是相似的。所以文中对于散点密集区域依据高度参数进行了进一步划分。如图 2 所示,飞行参数数据中随机选取的 2 个飞行任务剖面对应的飞行高度、飞行马赫数、转速、法向过载图。



(a) 飞行高度谱



(b) 飞行马赫数谱

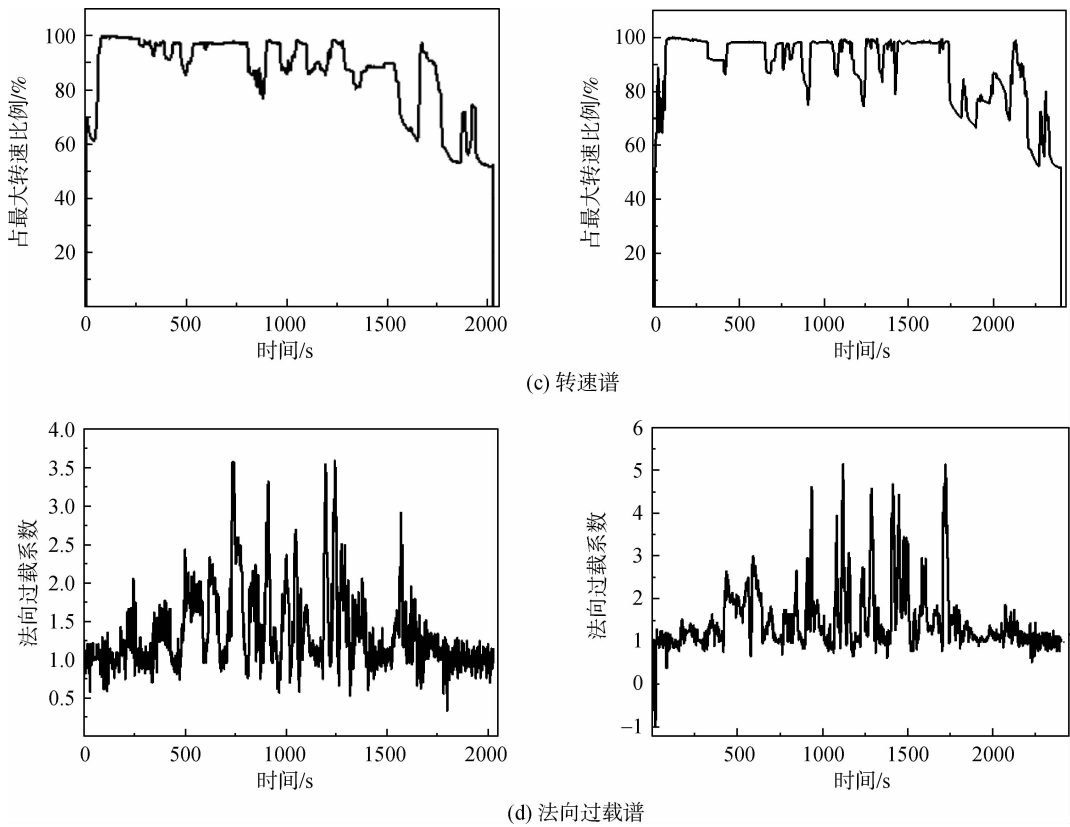


图 2 随机抽取的 2 个飞行任务剖面
Fig. 2 Randomly selected two mission profiles

2 飞行任务剖面聚类

图 3 中每一个点代表一个飞行任务剖面,是通过 对每个飞行剖面除去起飞和降落段后对中间的飞行任务段选取飞行高度和飞行马赫数这两个飞行参数进行加权平均获得的。从图中可以看出飞行任务剖面主要集中于无量纲飞行高度在 0.2~1.2 之间,飞行马赫数在 0.6~1.0 之间,所以可以将无量纲飞行高度在 1.2 以上,飞行马赫数在 1.0 以上分为一类;将无量纲飞行高度在

0.2 以下,飞行马赫数在 0.6 以下分为另一类。

2.1 高空高速飞行剖面的划分

根据图 4 所示,将飞行高度大于 1.2,飞行马赫数大于 1 的部分,定义为高空高速飞行,图 4 所示的剖面 1、2、3、4 可归为此类。

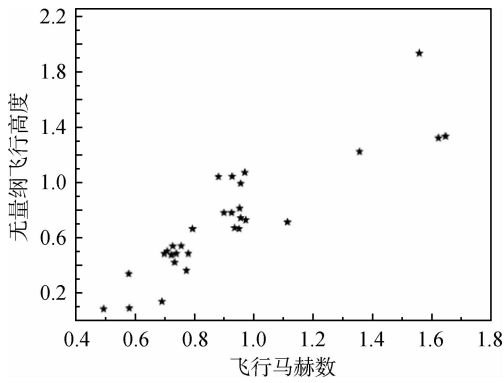


图 3 31 个飞行任务剖面聚类散点图
Fig. 3 31 flight mission profiles clustered scatter plot

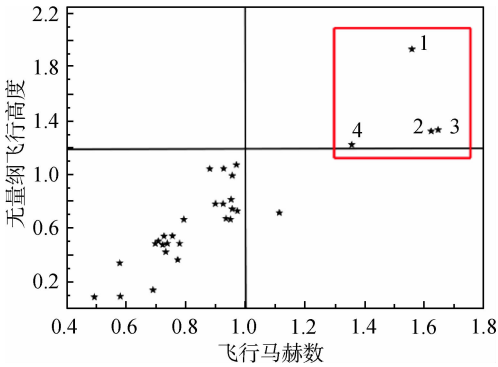


图 4 聚类散点图中的高空高速飞行任务剖面
Fig. 4 High-altitude high-speed flight mission profile in clustered scatter plots

在分类过程中,先利用雨流计数法对任务剖面进行滤波,去除小幅值,使得处理后的波形更加平滑、简明,从而便于之后的划分和疲劳载荷中的 0-最大-0 全循环、慢车-最大-慢车半循环统计,同

时可以降低后续损伤计算、寿命预测和加载试验的工作量^[20],对于高空高速飞行剖面滤波阈值设置为 0.05,因为飞行高度数值较大,阈值设置数值过小滤除不了小幅值,过大则无法保留原始载荷谱信息。图 5 即为对高空高速飞行典型任务剖面(图 6)的滤波图(其中蓝线为原始载荷谱,黑线为雨流谱,绿线为基于雨流法的滤波谱),去除了对分类无用的载荷循环,根据滤波后的高度谱可以较为轻易地提取出高空高速飞行剖面。

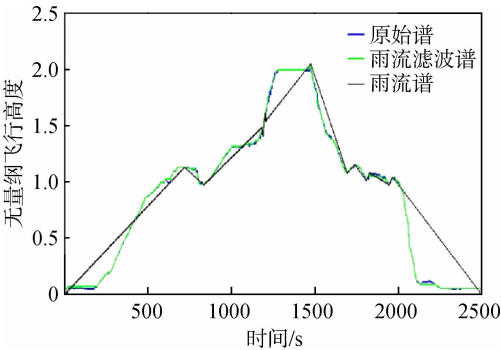


图 5 典型高空高速飞行任务剖面的飞行高度滤波谱
Fig. 5 Flight height filtering spectrum of typical high-altitude high-speed flight mission profiles

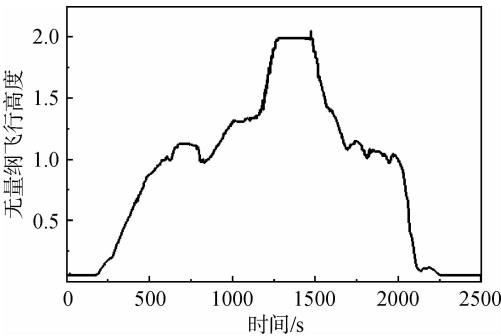


图 6 典型高空高速飞行任务剖面的飞行高度谱
Fig. 6 Flight height spectrum of typical high-altitude high-speed flight mission profile

如图 6 和图 7 所示即为高空高速飞行典型剖面的飞行高度谱和飞行马赫数谱,飞机飞行任务段中长时间无量纲飞行高度大于 1.2 且马赫数大于 1.0。

2.2 低空低速飞行剖面的划分

如图 3 所示,还可以将无量纲飞行高度在 0.2 以下、马赫数小于 0.6 的归为一类,定义为低空低速飞行,图 8 所示的任务剖面 5、6 可归为此类。

在分类过程中,对于低空低速飞行剖面,飞行高度数值较小,如果仍按经验设置为 0.05,则飞

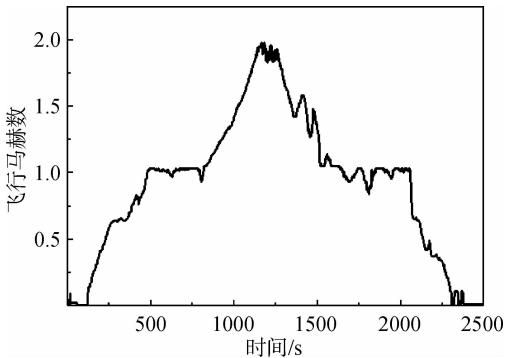


图 7 典型高空高速飞行任务剖面的飞行马赫数谱
Fig. 7 Flight Mach number spectrum of typical high-altitude high-speed flight mission profile

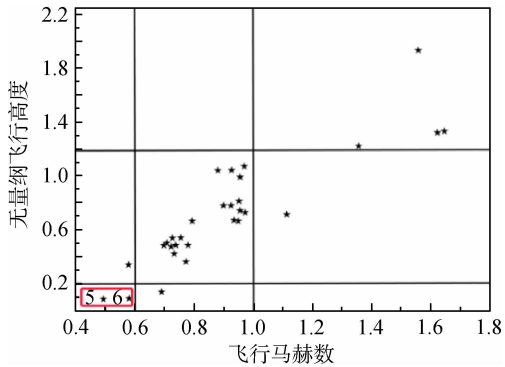


图 8 聚类散点图中的低空低速飞行任务剖面
Fig. 8 Low-altitude low-speed flight mission profiles in clustered scatter plots

行剖面中的重要信息也将被滤掉,因此依据剖面类型特点,将此类剖面滤波阈值设置为 0.01,图 9 即为对低空低速飞行典型任务剖面(图 10)的滤波图,可以滤去除对分类无用的载荷循环,提取滤波后的高度谱峰值在 0.2 以下的剖面归类为低空低速飞行剖面。

如图 10 和图 11 所示即为低空低速飞行典型

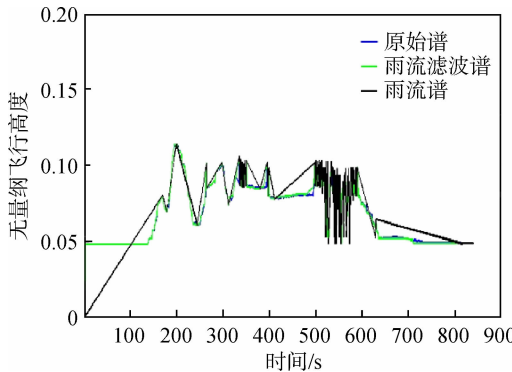


图 9 典型低空低速飞行任务剖面的飞行高度滤波谱
Fig. 9 Flight height filtering spectrum of typical low-altitude low-speed flight mission profile

剖面的飞行高度谱和飞行马赫数谱,飞机飞行任务段中飞行高度品取平均后低于 0.2 且飞行马赫数小于 0.6。

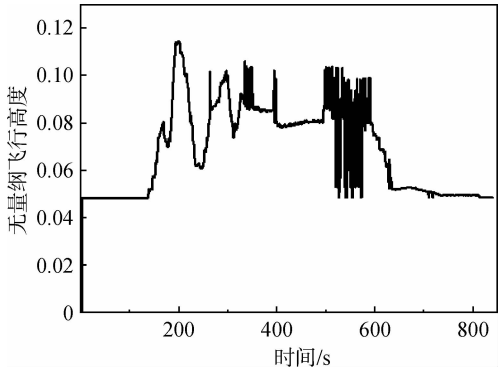


图 10 典型低空低速飞行任务剖面的飞行高度谱
Fig. 10 Flight height spectrum of typical low-altitude low-speed flight mission profile

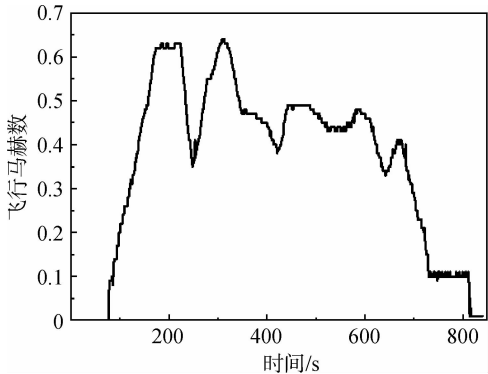


图 11 典型低空低速飞行任务剖面的飞行马赫数谱
Fig. 11 Flight Mach number spectrum of typical low-altitude low-speed flight mission profile

2.3 其他区域飞行剖面的划分

飞行任务剖面 7、8、9 是依据聚类原则划分剩余的剖面,如图 12。可以看到在它们所在的区域,每个区域只有一个剖面,因此这些剖面具备较强的典型性,但由于数量较少并不具有代表性。

如图 13 和图 14 所示即为剖面 7 的飞行高度谱和飞行马赫数谱,飞机飞行任务段中无量纲飞行高度在 0.2~1.2 之间,飞行马赫数在 0.4~0.6 之间,飞机处于中空低马赫数区域飞行。

如图 15 和图 16 所示即为剖面 8 的飞行高度谱和飞行马赫数谱,飞机飞行任务段中无量纲飞行高度小于 0.2,飞行马赫数在 0.6~1.0 之间,飞机处于低空中马赫数区域飞行。

如图 17 和图 18 所示即为剖面 9 的飞行高度谱和飞行马赫数谱,飞机飞行任务段中无量纲飞

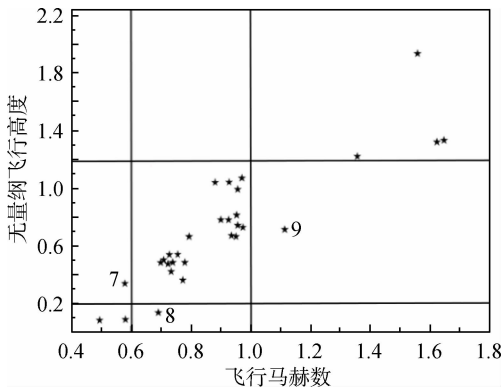


图 12 聚类散点图中的其他区域飞行任务剖面
Fig. 12 Other areas of the flight mission profiles in clustered scatterplots

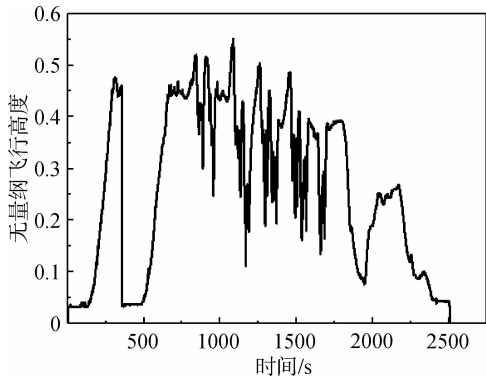


图 13 飞行任务剖面 7 的飞行高度谱
Fig. 13 Flight height spectrum of flight mission profile 7

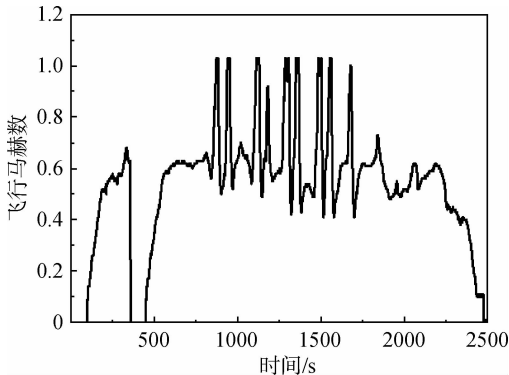


图 14 飞行任务剖面 7 的飞行马赫数谱
Fig. 14 Flight Mach number spectrum of flight mission profile 7

行高度在 0.2~1.2 之间,飞行马赫数大于 1.0,飞机处于中空高马赫数区域飞行。

2.4 高空俯冲飞行剖面的划分

针对飞行高度在 0.2~1.2 之间,飞行马赫数在 0.6~1.0 之间的任务剖面(图 12),根据飞行高度特征及变化规律可以分为以下 3 类:高空空

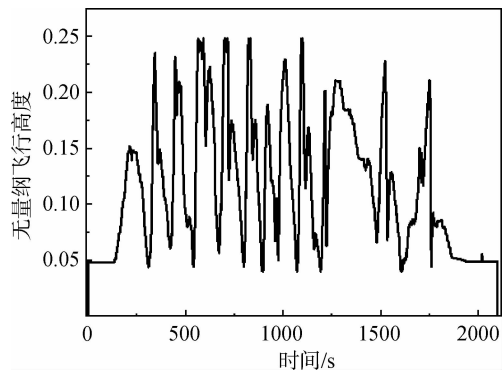


图 15 飞行任务剖面 8 的飞行高度谱
Fig. 15 Flight height profile of flight mission profile 8

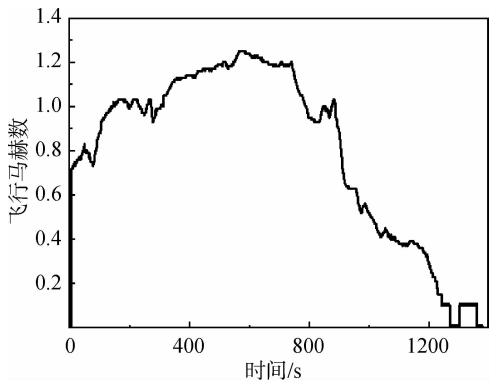


图 18 飞行任务剖面 9 的飞行马赫数谱
Fig. 18 Flight Mach number spectrum of flight mission profile 9

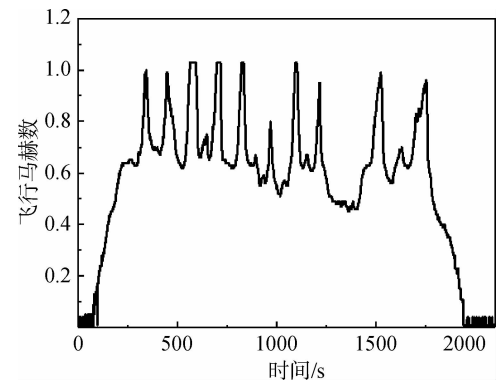


图 16 飞行任务剖面 8 的飞行马赫数谱
Fig. 16 Flight Mach number spectrum of flight mission profile 8

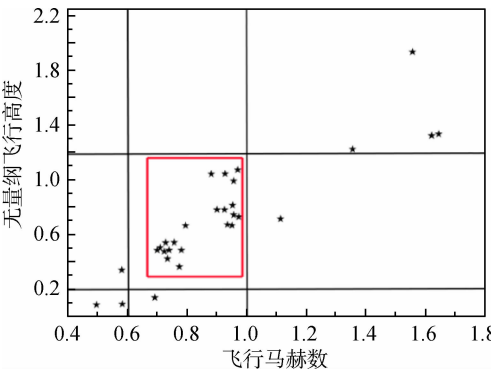


图 19 聚类散点图中的密集区域飞行任务剖面
Fig. 19 Intensive area flight mission profiles in cluster scatter plots

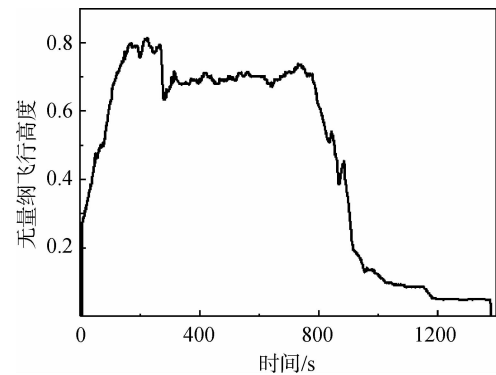


图 17 飞行任务剖面 9 的飞行高度谱
Fig. 17 Flight height profile of flight mission profile 9

中格斗,从高空俯冲到低空进行对地打击,低空空格斗。

如图 19 所示,定义无量纲飞行高度在 0.7 以上,下降段峰、谷值之差大于 0.4 的飞行剖面为高空俯冲,描述为飞机从 0.7 以上的高空俯冲到 0.3 以下的低空对地进行打击,满足上述条件的可归为此类,这一类短时间内向下俯冲的距离最

长,对飞机造成的损伤最大。
图 20 即为对高空俯冲典型任务剖面(图 21)的滤波图,滤波阈值设置为 0.05,针对雨流谱所对应的黑线,取峰值大于 0.7,峰谷值之差大于 0.4 的剖面。在飞机飞行任务任务段中有时会出现长时间的波动,之后降落段也会出现上述的情况(如之后的高空高中格斗剖面),但不属于高空俯冲这一任务剖面,所以为了排除降落段出现此特征的剖面,在飞行高度谱中选取时间的前 80% 的时间历程进行分类,之后再根据生成的滤波图进一步筛选。

2.5 空中格斗飞行剖面的划分

剩下的所有剖面可以全部归为空中格斗,但根据所处飞行高度的不同可分为高空空中格斗和低空空格斗。将无量纲飞行高度在 0.4 以上的空中格斗定义为高空空中格斗,0.4 以下的定义为低空空格斗。图 22 和图 23 所示的就是高空空中格斗和低空空格斗。不难发现,图 22 所示,飞机在无量纲飞行高度为 0.05~0.2 之间且

变化剧烈,此阶段飞行高度较低,故定义为低空空格斗。图 23 所示,飞机在无量纲飞行高度为 0.6~0.7 之间且变化剧烈,可见飞机在此阶段机动动作明显,符合战斗机空中格斗特征,因此此阶段飞行高度较高,故定义为高空空中格斗。

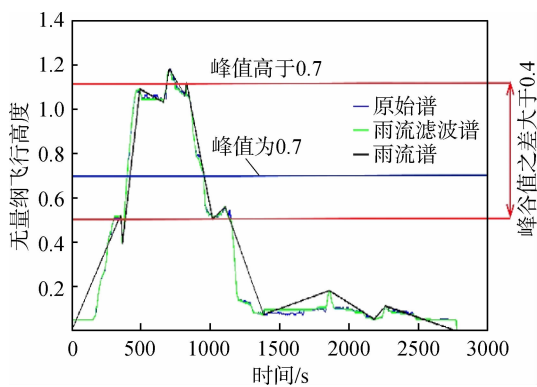


图 20 典型高空俯冲飞行任务剖面的飞行高度滤波谱
Fig. 20 Flight height filtering spectrum of typical high-altitude dive flight mission profiles

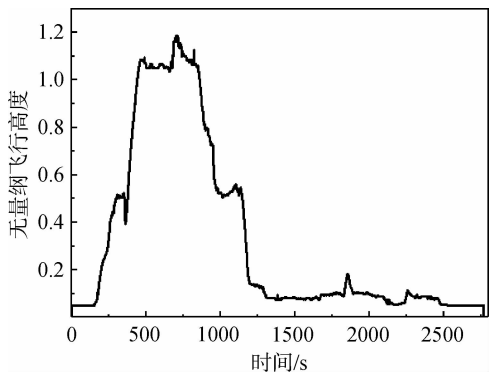


图 21 典型高空俯冲飞行任务剖面的飞行高度谱
Fig. 21 Flight height spectrum of typical high-altitude dive flight mission profile

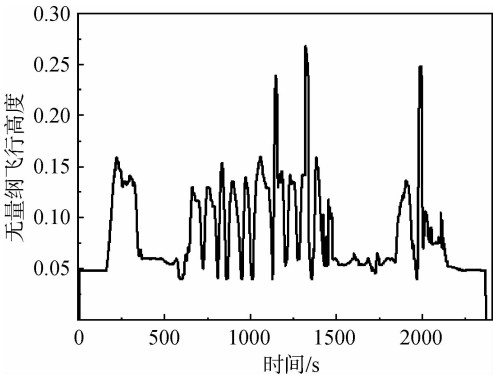


图 22 典型低空空格斗飞行任务剖面的飞行高度谱
Fig. 22 Flight height spectrum of typical low-altitude air combat flight mission profile

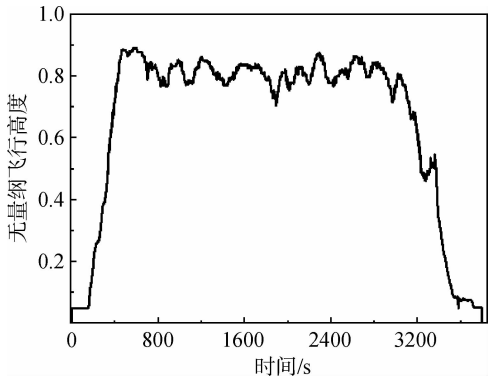


图 23 典型高空空中格斗飞行任务剖面的飞行高度谱
Fig. 23 Flight height spectrum of typical high-altitude aerial combat flight mission profile

3 结 论

本文开展了基于任务段的航空发动机载荷谱聚类方法研究,提出了利用聚类散点图对航空发动机飞行任务剖面进行分类的方法,并对某战斗机发动机 31 个飞行任务剖面进行了聚类分析,最终将剖面类型划分为 5 大类。

1) 对 31 个飞行任务剖面进行了聚类研究,利用飞行高度和飞行马赫数两个飞行参数作为主要分类依据,将无量纲飞行高度大于 1.0、马赫数大于 1.0,无量纲飞行高度小于 0.2、马赫数小于 0.5 分别归类为高空高速飞行和低空低速飞行。将飞行高度与飞行马赫数处于其他区域的剖面(除去上述的高空高速飞行和低空低速飞行剖面所在区域以及无量纲飞行高度在 0.2~1.2,飞行马赫数在 0.6~1.0 之间的散点密集区域)归类为其他区域飞行剖面。

2) 针对散点密集区域,依据高空俯冲向下这一任务段典型的高度变化特征,将无量纲飞行高度大于 0.7,俯冲向下距离大于 0.4,归类为高空俯冲剖面。之后,将剩下的剖面定义为空中格斗,再根据飞行高度的不同,以无量纲飞行高度以 0.4 为界,之上的称为高空空中格斗,之下的称为低空空格斗。

3) 在不同机型、不同条件下,飞行训练大纲也会有所变化,那么所对应的飞行剖面情况也会发生变化。但是依据本文所提出的方法,先生成聚类散点图,按所在区域进行初步分类,后再对密集区域依据剖面特征进一步分类是可操作的,但会依据不同实际情况,分出相应的类别。

参考文献:

[1] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动

机通用规范使用指南:GJB/Z216-2004[S]. 北京:国防科学技术工业委员会出版社,2004:1-170.

[2] 国防科学技术工业委员会. 航空燃气涡轮喷气、涡轮风扇发动机通用规范:GJB241-87[S]. 北京:航空标准化出版社,1976:1-166.

[3] United States Air Force. Engine structural integrity program(ENSIP): MIL-STD-1783 [S]. Washington: United States Department of Defense,1984:1-59.

[4] United States Department of Defense. General specification for aircraft turbojet, turbofan, turboshaft and turboprop engine:JSSG-87231A[S]. Washington: United States Department of Defense,1995:1-370.

[5] 程礼,冯伟,陈卫. 航空发动机飞行任务剖面统计规律研究[J]. 航空动力学报,2003,18(6):749-752.

CHENG Li,FENG Wei,CHEN Wei. Study of the statistical rules for flight mission profiles of aero-engine[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(6):749-752. (in Chinese)

[6] 宋迎东,高德平. 发动机机动飞行类综合载荷谱研究[J]. 航空动力学报,2002,17(2):212-216.

SONG Yingdong,GAO Deping. Aeroengine composite maneuver loading spectrum derivation[J]. Journas of Aerospace Power,2002,17(2):212-216. (in Chinese)

[7] 苏清友,孔瑞莲,陈筱雄. 航空涡喷、涡扇发动机主要零部件定寿指南[M]. 北京:航空工业出版社,2004.

[8] 航空工业部发动机管理局. WP-6 发动机寿命研究报告[R]. 沈阳:沈阳发动机厂,1988.

[9] 程德金. 模糊数学在飞行试验数据处理中的应用[J]. 飞行力学,1994,12(2):52-59.

CHENG Dejin. The applications of fuzzy math in data processing[J]. Flight Dynamics,1994,12(2):52-59. (in Chinese)

[10] 张利敏. 基于模糊聚类算法的路面识别的研究[D]. 江苏镇江:江苏科技大学,2014.

ZHANG Limin. Research of road recognition based on fuzzy clustering algorithm[D]. Zhenjiang Jiangsu:Jiangsu University of Science and Technology,2014. (in Chinese)

[11] WANG H M,KIM J H,JUNG D Y. Power Interconnected system clustering with advanced fuzzy C-mean algorithm [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011,18(1):190-195.

[12] WANG Decai,ZHANG Ganlin,PAN Xianzhang. Mapping soil texture of a plain area using fuzzy-C-means clustering method based on land surface diurnal temperature difference[J]. Pedosphere,2012,22(3):394-403.

[13] 赵章焰,夏文俊,李爱华,等. 基于层次聚类桥架起重机整机载荷谱编制方法[J]. 武汉理工大学学报,2015,37(12):68-72.

ZHAO Zhangyan,XIA Wenjun,LI Aihua,et al. Method of compiling whole machine load spectrum of bridge crane based on clustering algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2015,37(12):68-72. (in Chinese)

[14] 孙中辉,刘宝印,郭彦颖. 基于系统聚类的不同零部件的失效地区特征分析[R]. 上海:中国汽车工程学会年会,2016.

[15] 宋迎东,高德平. 发动机飞行任务剖面的主成份聚类法[J]. 航空动力学报,2002,17(2):196-200.

SONG Yingdong,GAO Deping. The principal component analysis method for engine flight mission profiles categorization[J]. Journal of Aerospace Power,2002,17(2):196-200. (in Chinese).

[16] 任冀宾,王斌团. 基于飞行参数灵敏度的飞机疲劳载荷谱典型飞行任务剖面研究[R]. 江西 井冈山:第 14 届全国疲劳与断裂学术会议,2008.

[17] 付春梅,刘俊宁. Kmeans 与系统聚类法结合在脑电图中的应用[J]. 科技信息,2007(29):191-192.

FU Chunmei,LIU Junning. Application of Kmeans combined with system clustering in EEG [J]. Science and Technology Information,2007(29):191-192. (in Chinese)

[18] 韩雅雯. Kmeans 聚类算法的改进及其在信息检索系统中的应用[D]. 昆明:云南大学,2016.

HAN Yawen. Improvement of Kmeans clustering algorithm and its application in information retrieval system [D]. Kunming: Yunnan University,2016. (in Chinese)

[19] 李双虎,王铁洪. Kmeans 聚类分析算法中一个新的确定聚类个数有效性的指标[J]. 河北省科学院学报,2003,20(4):199-202.

LI Shuanghu,WANG Tiehong. New validity index for determining the number of clusters in Kmeans clustering[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences,2003,20(4):199-202. (in Chinese)

[20] 赵方伟,谢基龙. 小应力循环对 C70E 型车体疲劳损伤的影响研究[J]. 机械工程学报,2014,50(10):121-126.

ZHAO Fangwei,XIE Jilong. Influence of small stress cycles on the fatigue damage of C70E car body[J]. Journal of Mechanical Engineering,2014,50(10):121-126. (in Chinese)

(编辑:王碧珺)