

基于贝叶斯反馈云模型的 航空发动机性能评估*

Aeroengine Performance Evaluation Based on Bayesian Feedback Cloud Model

中国民航大学通用航空学院

黄燕晓

中国民航大学航空工程学院

李书明

杨念苏



黄燕晓

工学硕士,主要研究方向为民航飞机发动机健康管理技术。作为主要参与者,参与上海飞机客户服务有限公司的飞机运行实时监控与健康管理系统子课题项目。目前,作为主持人参与2012中央高校基本科研业务费资助项目“面向云理论的民航发动机性能评估模型”研究。

作为复杂系统的航空发动机,在高速、高温和高压环境下工作,受较高热应力和机械应力影响,运行中常

针对在翼发动机运行性能变化关键时机预测问题,结合贝叶斯反馈分析方法,将在翼发动机运行前后性能信息结合进行反馈,评估当前发动机性能基于初始性能状态的变化关系,不仅实现发动机性能状态准确评估,更能及时预测发动机性能状态变化时机,为在翼发动机可靠运行和及时换发提供决策支持。

出现问题:气路间隙增加,压气机叶片表面被侵蚀,主轴承负荷过大引起磨损等,导致发动机效率下降,推力达不到起飞要求等。为保持有足够起飞推力,须增加发动机喷油量提高涡轮前燃气总温,但是这将导致发动机热端部件损坏引起性能下降^[1],直接影响发动机在翼寿命。为确保可靠工作和及时换发,常使用单参数或有限参数,如发动机排气温度、高低压转子转速偏差或转子振动径向变化等评估发动机性能变化及预测变化时机^[2-3]。这些方法计算比较简单,但影响发动机性能的因素众多,很难全面反映实际状况。

该问题可从两个角度解决:其

一,从装配于飞机的快速存取记录器(Quick Access Recorder, QAR)提取发动机性能信息,提出多参数且大流量信息评估方法。如王梦琦^[4]、谭巍^[5]等以改进模糊综合评判、模糊信息熵等进行评估方法探索,但QAR信息的模糊性和随机性降低发动机性能评估的准确度。在此提出能将性能信息随机性和模糊性集成,使大量离散性能信息连续化的云理论^[6],构建多参数大流量信息的发动机性能云重心评估准则。其二,针对在翼发动机运行性能变化关键时机预测问题,结合贝叶斯反馈分析方法^[7],将在翼发动机运行前后性能信息结合进行反馈,评估当前发动机性能基于初始

* 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(ZXH2012P003)资助。

性能状态的变化关系,不仅实现发动机性能状态准确评估,更能及时预测发动机性能状态变化时机,为在翼发动机可靠运行和及时换发提供决策支持。

贝叶斯反馈云评估模型

1 贝叶斯反馈云模型分析

云由李德毅教授^[6]提出,适用于处理自然界中大量随机和模糊信息,常用正态云实现随机和模糊的定量信息到定性正态云概念的不确定转换。云的数字特征为期望值 Ex 、熵 En 、超熵 He ,分别表示不同运行阶段发动机性能状态信息的均值、发动机性能离散信息范围和范围不确定度等,依此将具有模糊性和随机性的发动机性能信息集成,形成性能信息定量定性相互映射。

利用正态云将某飞行阶段发动机性能离散信息以云数字特征表示,而对于基于时间序列引起的发动机性能变化与初始发动机性能结合则主要依靠贝叶斯反馈分析法。该方法为计算假设概率的方法,基于先验性能信息,结合在时间序列下得到变化的后验性能信息,将先验信息和后验信息结合,依据贝叶斯公式^[7]分析基于时间序列的发动机性能变化状况。

2 云模型评估发动机性能关键内容

2.1 确定发动机性能云重心评估准则

在翼发动机无故障运行中,随着时间序列变化,发动机性能将逐渐衰退,表征发动机性能的参数值也随之变化,故提出将 n 维参数云模型融合为发动机性能综合云模型评估发动机性能。即 n 维性能参数在变化时,发动机综合云模型重心也将随之改变^[8]。

n 维参数综合云模型重心 O 用 T 维向量表示。其中 L 和 H_i 分别表示云重心位置和云重心高度。在云重心评估准则中,以发动机性能信息

期望值表示云重心位置,发动机性能参数权值表示云重心高度。

$$\begin{cases} O = (O_1, O_2, \dots, O_n) = L \times H \\ O_i = L_i \times H_i, (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ L_i = (Ex_i, Ex_i, \dots, Ex_i) \\ H_i = (h_1, h_2, \dots, h_i) \end{cases}, (1)$$

在实际评估中难以获取在翼发动机性能参数基线值,故提出依据逼近理想解排序法对机队中发动机各性能参数信息进行排序,以经济型和效益型对参数分类,列出时间序列内发动机机队中各性能参数最优值和最劣值,作为该型发动机某运行周期内性能参数的最佳和差基线,设置最理想状态下发动机性能综合云重心向量:

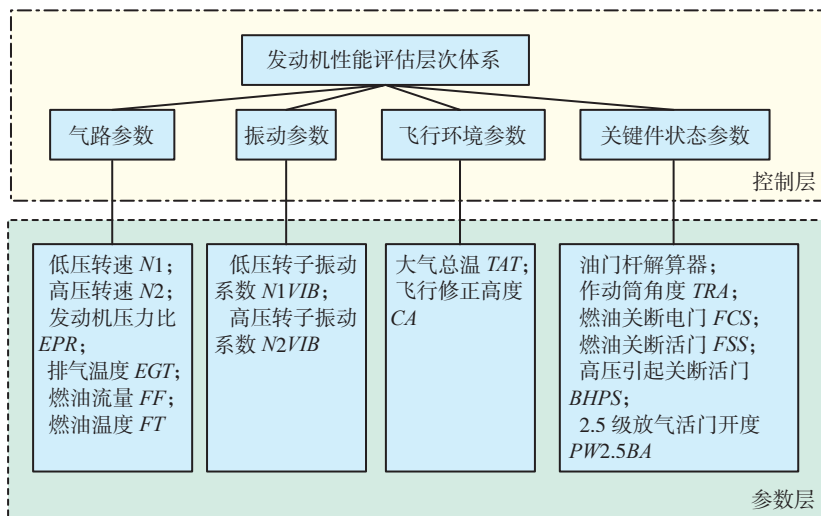


图1 发动机性能评估层次体系

$$\begin{cases} O^0 = L \times H^T = (G_1^0, G_2^0, \dots, G_n^0) \\ L = (Ex_1^0, Ex_2^0, \dots, Ex_n^0) \\ H = (h_1^0, h_2^0, \dots, h_n^0) \end{cases}。 (2)$$

将机队中各台发动机性能综合云重心向量 O 进行归一化处理:

$$O_i^T = \frac{O_i}{O_i^0} (i = 1, 2, \dots, n)。(3)$$

计算发动机性能综合云重心加权偏离度 λ , 确定发动机性能状态。

$$\lambda = \sum_{j=1}^n (H_j \times O_j^T)$$

$$(j=1, 2, \dots, n), \lambda \in (0, 1)。(4)$$

2.2 确定发动机性能参数权值

确定发动机性能参数权值主要是定性分析判断法,但这些方法有

较大的主观随意性。故单纯以定性分析法确定权值很难准确确定性能参数权值。故引入网络层次分析法 (Analytic Net hierarchy Process, ANP), 在层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 基础上, 分析发动机各性能参数间的相关性及相关度, 解决 AHP 方法主观随意性太大的不足, 建立发动机性能参数权值计算模型。

基于评估发动机性能的信息源于 QAR, 从中提取显著影响发动机性能的参数, 通过分析各参数类型, 将各参数分类归纳, 构建发动机性能评估层次体系, 如图 1 所示。

针对发动机性能参数层, 依据发

动机原理分析各参数间相关性, 确立性能参数间的相关关系网络, 如图 2 所示。图 2 中两参数间的箭头表示两参数间存在相关性, 而且箭头指向哪个参数, 说明其他参数的变化会引起该参数的变化, 如果是双箭头表示两个参数变化相互影响。

在分析发动机各性能参数相关关系的基础上, 依据 1~9 标度法给出各性能参数对发动机性能总的影晌程度, 构建各性能参数的正负反判断矩阵, 即超矩阵。将发动机各性能参数的超矩阵归一化, 求取发动机各性能参数的加权超矩阵。

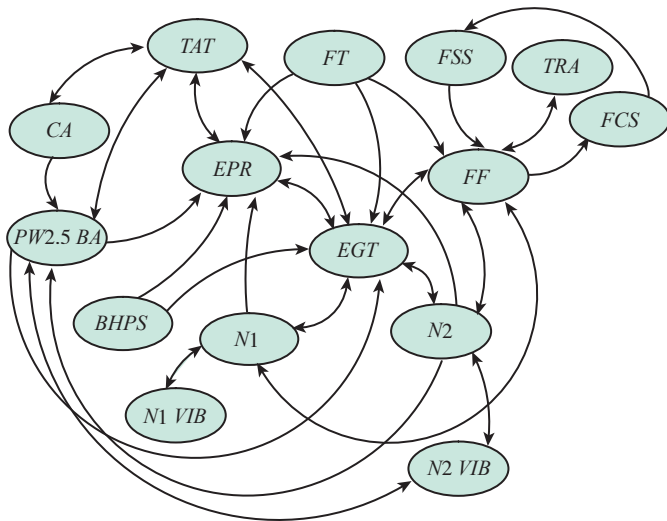


图2 发动机性能参数相关性网络

将发动机性能参数加权超矩阵各行向量自乘,直到各行数字一致且不变,所得矩阵即为极限超矩阵。矩阵中数值即发动机各性能参数对发动机性能的权值。表1为发动机参数权值归一化的结果,并对权值进行排序。

分析表1可知各参数对发动机性能的影响关系:控制层中显著影响发动机性能的为气路性能参数,影响最弱的为振动参数,两类所占权值比为6.45:1;性能参数层中显著影响发动机性能的为EGT和FF,两者权值均大于0.15,影响最弱的参数为N1VIB、FCS和FSS,三者权值均小于0.01,两类权值比大于15:1,差距较大。

表1 发动机各参数权值及排序

控制层参数及权值	气路参数(0.6580)						振动参数(0.0226)	
性能层参数	N1	N2	EPR	EGT	FF	FT	N1VIB	N2VIB
权值	0.0866	0.1192	0.0189	0.2498	0.1685	0.0151	0.0077	0.0149
排序	6	3	10	1	2	11	13	12
控制层参数及权值	飞行环境参数(0.2172)		关键件状态参数(0.1020)					
性能层参数	TAT	CA	TRA	FCS	FSS	BHPS	PW2.5BA	
权值	0.1182	0.0991	0.0220	0.0076	0.0073	0.0222	0.0429	
排序	4	5	9	14	15	8	7	

2.3 反馈云评估模型

(1)生成云滴。

依据某阶段发动机性能参数信息 x_i ,计算发动机各性能参数信息均值和方差,求出云特征参数,并以逆向云发生器将其生成云滴。

样本均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i ; \quad (5)$$

样本方差:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (6)$$

云特征参数:

$$\begin{cases} Ex = \bar{X} \\ En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{X}| \\ He = \sqrt{S^2 - En^2} \end{cases} \quad (7)$$

(2)设置云滴检验标准。

以置信度为第一标准,对生成的大量表征发动机性能参数信息云滴进行检验,预测初设的云特征参数是否能准确表征当前发动机性能状态。依据实际工程经验,预先设置发动机性能参数信息置信度 $(1-\alpha)$ 。由于将采集到的发动机性能参数信息分布看作正态分布,所以发动机性能参数信息云服从 $N(Ex, En^2)$,根据中心极限定理:

$$\lim p\left(\left|\frac{x-Ex}{En}\right|\right) \leq 1-\alpha \quad (8)$$

计算置信区间,得到拒绝域为:

$$x < Ex - Z_{\alpha/2} \times En$$

或

$$x > Ex + Z_{\alpha/2} \times En。$$

其中, $Z_{\alpha/2}$ 为发动机性能信息的准正态分布两侧百分点位。因为采集到的离散发动机性能信息必须在拒绝域以外才有效,所以任何在拒绝域内的性能参数信息将会降低评估准确度。

由于飞机对发动机运行高的安全可靠要求,故还以落入拒绝域内的发动机性能信息云滴占总云滴数的3%作为第二标准:如果超过3%的发动机性能信息云滴在拒绝域内,那么认为发动机性能状态已经改变,初设的发动机性能参数信息云特征参数已经不可靠,需要及时采集当前发动机离散性能信息,修正发动机性能参数云特征值。

如果发动机性能参数信息变化满足以上两个检验标准,则意味着发动机性能变化超出安全范围,必须以贝叶斯计算公式,将发动机当前性能参数信息进行反馈^[9],修正初设的发动机性能云特征参数。

设性能参数信息云中的 Ex 的先验分布服从正态分布 $N(c_0, \sigma^2)$, c_0 表示云特征参数 Ex 均值, σ_0 表示 Ex 确定度,依据当前的发动机性能信息 X ,根据后验概率分布得到当前的云特征参数:

$$\begin{cases} Ex' = \frac{\left(\frac{\bar{X}}{(En^2 + He^2)/n} + \frac{c_0}{\sigma^2}\right)}{\left(\frac{1}{(En^2 + He^2)/n} + \frac{1}{\sigma^2}\right)} \\ En' = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex'| \\ He' = \sqrt{S^2 - (En')^2} \end{cases} \quad (9)$$

(3) 计算云重心加权偏离度。

计算出当前发动机性能信息云特征值,依据发动机云重心评估准则计算发动机当前性能云重心加权偏离度。分析当前时刻和初始时刻发动机性能云重心加权偏离度变化,判断在时间序列下发动机性能变化,即性能衰退情况。

评估模型算例验证

由于在巡航状态下,发动机运行最为稳定,参数值也稳定。故提取巡航状态下某发动机 2009 年 3 月 24 日和 2009 年 8 月 14 日两时刻的性能参数信息计算,分析在近 6 个月内该发动机性能变化。

(1) 发动机性能参数信息归一化。

依据效益型、成本型和固定型,对各性能参数分类: EPR 、 $N1$ 、 $N2$ 和 CA 为效益型参数,即越大越优型参数; EGT 、 FF 、 $N1VIB$ 和 $N2VIB$ 为成本型参数,即越小越优参数; FT 、 $PW2.5BA$ 、 TAT 、 TRA 、 FCS 、 FSS 和 $BHPS$ 为固定型参数,即越稳定越优参数。将各参数进行标准化处理,均变为数值越大性能越佳的参数。

(2) 对于性能参数层,由于 $PW2.5BA$ 、 $BPHS$ 、 FCS 和 FSS 状态

只有开或关两种,常定义开为 1,关为 0,而原始信息中它们处于开位,故 4 个参数的云特征值是不变的,为 $(1,0,0)$ 。

(3) 以发动机性能参数云特征值生成云滴。

其一,通过逆向云发生器,依据性能参数云特征值生成云滴,以正态云表示巡航阶段发动机性能参数信息。以控制层气路参数为例,2009 年 8 月 14 日气路参数云特征值 $(Ex, En) = (0.4799, 0.3259)$,图 3 为生成的 5000 个云滴表示的该阶段气路参数信息定性状态图。

其二,选取置信度 $\alpha=0.1, 0.05, 0.01$,对生成的云滴进行检验。根据中心极限定理计算该发动机当前性能信息拒绝域,依据工程实践经验设置拒绝域内云滴总数超过总云滴的 3%(即 $\gamma \geq 3\%$) 作为检验决策标准,如图 4 所示。

图 4 中,选取置信水平为 0.9 和 0.95 时,气路参数云图中拒绝域内云滴数(灰色云滴)未超过总云滴数的 3%,没达到检验决策标准。但是选取置信水平为 0.99 时, γ 已经超过 3%,说明选取的置信水平 0.9 和 0.95 不能精确显示气路参

数所表征的性能状态,同时也说明当前性能状态与初始状态相比已明显变化,须修正性能参数信息云特征值。

其三,结合初始气路性能参数信息,将当前性能气路参数信息反馈,通过公式(9)计算当前性能气路参数信息云特征值,并与初设的性能气路参数信息云特征参数比较,如图 5。贝叶斯反馈后的发动机性能参数云特征值代表的云图完全在初始发动机性能云图接受域内,即修正后的发动机性能参数信息云特征值准确表征当前发动机性能状态。

(4) 计算发动机性能云重心加权偏离度。

首先计算在巡航状态下该发动机运行时间序列下理想状态下云重心向量:

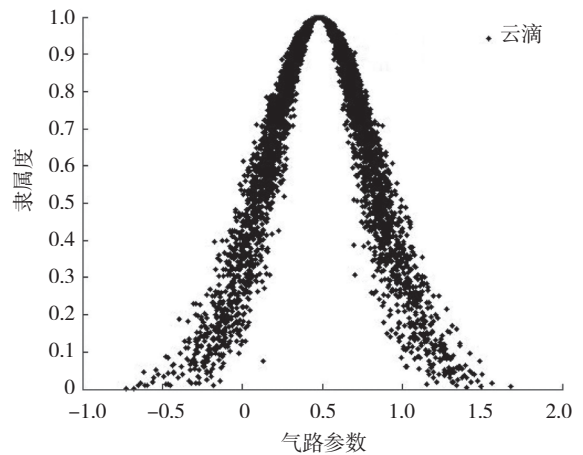


图3 气路参数云滴图

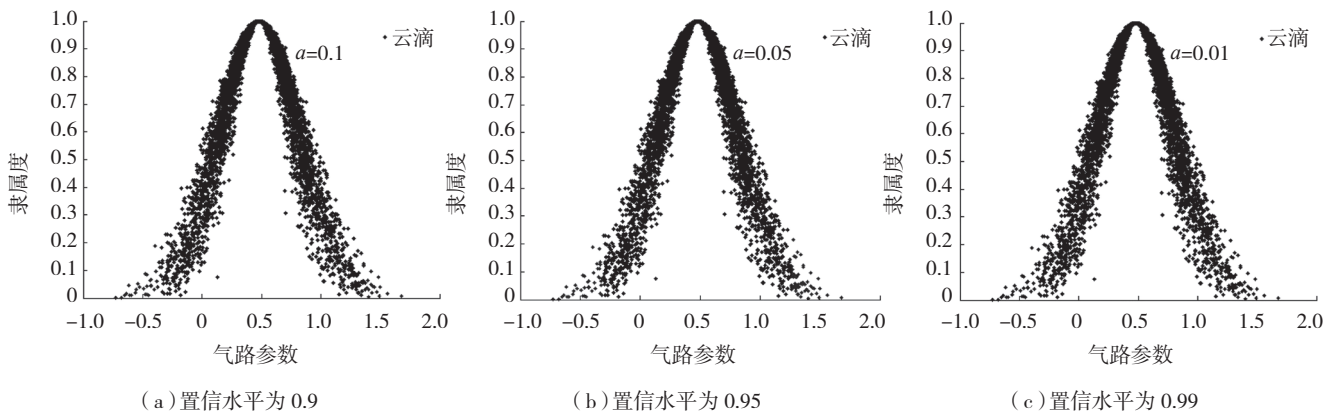


图4 置信水平为0.9、0.95、0.99云图

$$O^0 = (G_1^0, G_2^0, G_3^0, G_4^0) = L \times H^T = (1, 1, 1, 1) \times (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226) = (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226)$$

其次,计算在巡航状态下该发动机运行时间序列内不同时刻发动机性能云重心向量:

$$O_{090324}^1 = (O_1^1, O_2^1, O_3^1, O_4^1) = L \times H^T = (0.4893, 0.5020, 1, 0.4880) \times (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226) = (0.1063, 0.3303, 0.1020, 0.0111);$$

$$O_{090814}^1 = (O_1^1, O_2^1, O_3^1, O_4^1) = L \times H^T = (0.4710, 0.4769, 0.6526, 0.5039) \times (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226) = (0.1023, 0.3138, 0.0666, 0.0114)。$$

然后,将两个时刻发动机性能云重心向量归一化:

$$O_{090324}^T = (0.4893, 0.502, 0.989, 0.488);$$

$$O_{090814}^T = (0.471, 0.4769, 0.6526, 0.5039)。$$

最后,计算两个时刻该发动机性能加权偏离度:

$$\lambda_{090324} = \sum_{j=1}^n (H_j \times O_j^T) = (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226) \times (0.4893, 0.5020, 0.9890, 0.4880) = 0.5497;$$

$$\lambda_{090814} = \sum_{j=1}^n (H_j \times O_j^T) = (0.2173, 0.6580, 0.1020, 0.0226) \times (0.4710, 0.4769, 0.6526, 0.5039) = 0.4942。$$

计算该发动机在接近6个月运行时间内的性能衰退率:

$$\theta = \frac{\lambda_{090324} - \lambda_{090814}}{\lambda_{090324}} \times 100\% = \frac{0.5497 - 0.4942}{0.5497} \times 100\% = 10.09\%。$$

计算结果对比分析

利用 ANP 模型对该发动机两个时刻的性能进行评估,将计算结果与

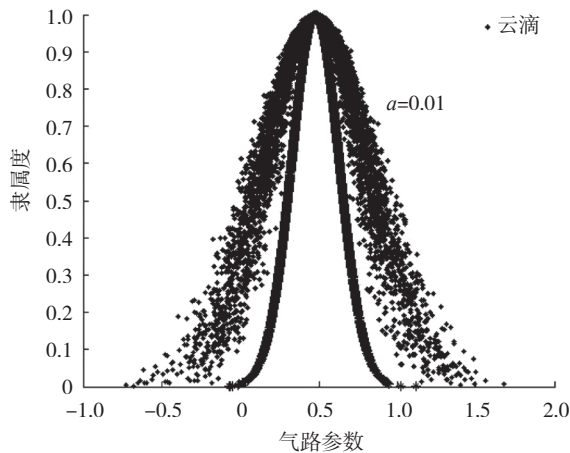


图5 贝叶斯反馈云图

通过贝叶斯反馈云模型评估的结果对比分析。

ANP 评估模型为存在相关性的非独立递阶层次结构评估法:在定性确定各参数间相关度基础上,以各参数间的相关优先度构造判断矩阵,定量计算并归一化得到各参数权值,同时进行符合一致性验证,各性能参数权值如表1所示。利用公式(10)计算两个时刻发动机的性能指数 Z_i ,如表2所示。

表2 基于贝叶斯反馈云模型及ANP模型的该发动机性能评估结果

该发动机运行时刻	贝叶斯反馈云模型		ANP 模型	
	加权偏离度 λ_i	衰退率 θ	性能指数 Z_i	衰退率 θ
090324	0.5497	10.09%	0.4790	10.65%
090814	0.4942		0.4280	

$$Z_i = \sum_{j=1}^{15} \sum_{j=1}^{15} H_j \times Ex_j$$

$$(i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, 15)。(10)$$

从表2得出:通过贝叶斯反馈云模型计算该发动机在近6个月内性能衰退率为10.09%,通过ANP模型得到的结果为10.65%。

故以贝叶斯反馈改进的云模型,与通过ANP模型得到的结果相差仅0.56%,基本一致,具有较高的可信度;同时对云模型进行贝叶斯反馈改进,增加对发动机性能参数信息的贝叶斯检验,能够判断出发动机性

能参数信息变化是否导致发动机状态根本性变化,减少了无效评估,进一步提高评估效度。

结论

(1)以最稳定的巡航阶段发动机性能信息进行发动机性能的评估,针对巡航阶段QAR的大流量信息,提出以正态云模型将巡航阶段的定量信息以定性云图表示。

(2)以云重心加权偏离度为准则构建云模型对发动机性能进行评估,同时针对发动机运行阶段性能不断衰退的现实,提出置信度和拒绝域云滴总数不超过总云滴数3%的检验条件,对发动机当前性能参数信息进行反馈。

(3)将贝叶斯反馈云模型得到的结果与ANP模型得到的结果进行比较,结果显示:通过贝叶斯反馈云

模型计算该发动机在近6个月内性能衰退率为10.09%,与通过ANP模型得到结果相差0.56%,结果基本一致,具有较高的可信度。

(4)不足之处:发动机性能参数权值的计算虽然考虑了性能参数间的相关性,但仍是以专家经验给出各参数的相关度计算权值的,仍有主观性。

本文共有参考文献9篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 深蓝)