

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.03.03

基于飞参数据的航空发动机综合性能评估方法

高峰, 曲建岭, 嵇绍康, 高峰娟
(海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041)

摘 要: 根据航空发动机综合性能分析的需要, 建立了某型航空发动机的综合性能评估模型。首先依据发动机工作状态的差异, 分别选取了合适的飞参数据作为性能评估指标, 然后分别采用层次分析法和模糊隶属函数法计算了各性能评估指标的权重值和归一化值, 并在此基础上采用线性加权和法计算了发动机综合性能评估值。实例分析表明, 该模型得出的发动机综合性能评估值能够较好地反映发动机综合性能的好坏, 对发动机的状态监控及故障诊断有着重要指导意义。

关键词: 飞参数据; 综合性能评估; 层次分析法; 模糊隶属函数; 航空发动机

中图分类号: TB9; V231

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)03-0014-06

Evaluation Method of Aero-engine Comprehensive Performance Based on Flight Data

GAO Feng, QU Jianling, JI Shaokang, GAO Fengjuan

(Qingdao Branch of Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: In order to analyze the aero-engine comprehensive performance, an evaluation model was set up. Firstly, according to the different aeroengine working states the suitable flight data were selected as performance evaluation indexes. Then the analytic hierarchy process and fuzzy membership function were used to calculate the weight values and the normalization values of the performance evaluation indexes respectively, and the aeroengine comprehensive performance value was calculated by using the linear weighted sum method. The example analysis showed that the aeroengine comprehensive performance value which was calculated by the evaluation model could well reflect the comprehensive performance of the aeroengine and had an important guiding significance to the condition monitoring and fault diagnosis of aeroengine.

Key words: flight data; comprehensive performance evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy membership functions; aeroengine

0 引言

发动机是飞机的关键部件, 其综合性能的好坏直接影响到飞机的飞行安全和可靠工作, 因此对发动机的综合性能进行评估非常有必要。发动机经过长时间、多次的工作后, 各部件的脏污、磨损、变形会使其性能恶化, 而这些都将通过发动机性能参数的变化表现出来, 跟踪、监控这些参数变化, 有助于发动机维护人员掌握发动机的工作性能变化。在飞机飞行过程中, 飞参记录系统(后文简称飞参系统)实时记录了大量的发动机工作参数, 这些数据真实、全面地反映了发动机的工作状况与性能变化, 可为发动机综合性能评估提供可靠的数据来源。然而由于飞参系统记录的发动机性能参数很多, 各性能参数对发动机的影响程度无法准确得知, 且各性能参数值具有不同的量纲, 所以对其性能参数权重的合理确定以及性能参数值的归一化处理存在很大困难。

文献[1]应用德尔菲法(即专家调查法)获取发动机性能参数权重值, 但过分依赖于主观判断和经验; 文献[2]采用遗传算法原理, 但是遗传算法本身存在收敛速度较慢和自身参数的选取问题等; 文献[3]利用粗糙集理论, 但是该方法对样本数据有很多要求, 且样本数据个数对计算结果有很大影响。为了避免以上方法的不足, 本文采用层次分析法^[4](The Analytic Hierarchy Process, AHP)和模糊隶属函数法来确定发动机综合性能评估中各性能参数的权重和归一化值, 并采用线性加权和法对其综合性能进行评估。实例证明该方法具有良好的逻辑性和实用性, 能够较好地对发动机性能进行综合评估。

1 层次分析法原理

AHP 是美国著名运筹学家、匹兹堡大学教授 T L Saaty 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种定量与定性分析相结合的系统分析方法, 此方法, 简洁方便, 广泛

应用于社会工程、网络通信、军事武器等领域，其基本步骤如下：

- 1)建立层次分析结构
- 深入分析所面临的问题，将问题所包含的元素划分为不同层次，如目标层、准则层、指标层等。
- 2)构造判断矩阵
- 在各层元素之间进行两两比较，判断其相对重要性，构造出判断矩阵。层次分析法的一个重要的组成部分就是对同一层次中的若干元素在上一层被支配元素中所占权重进行比较，比较的特点是对人们的判断进行量化处理，并赋予相应的标度值，本文采用如表1所示的9/9~9/1标度法对其赋值。比较时，第*i*个元素与第*j*个元素的相对权重可用*a_{ij}*表示。设共有*n*个元素参与比较，则*A* = (*a_{ij}*)_{*n* × *n*}称为判断矩阵，一般有下列基本特点：*a_{ij}* > 0; *a_{ii}* = 1; *a_{ij}* = $\frac{1}{a_{ji}}$ 。

表1 9/9~9/1 标度的含义	
标度	含义
9/9	表示两个元素相比同等重要
9/7	表示两个元素相比，前者比后者稍微重要
9/5	表示两个元素相比，前者比后者明显重要
9/3	表示两个元素相比，前者比后者强烈重要
9/1	表示两个元素相比，前者比后者极端重要
9/(10 - <i>k</i>)	<i>k</i> = 2, 4, 6, 8 时，表示上述相邻判断的中值

- 3)计算元素权重并检验一致性
- 对于判断矩阵*A*，计算满足下式的特征根和特征向量

$$AW = \lambda_{\max} W$$

(1)

式中： $\lambda_{\max}$ 为*A*的最大特征根；*W*为对应于 $\lambda_{\max}$ 的正规化特征向量。*W*的分量*W_i*即为该层相应元素对上一层元素的相对权重。本文采用计算简单方便的和积法计算*W*和 $\lambda_{\max}$ ，具体步骤如下：

第一步：将判断矩阵*A*按列归一化，得到矩阵*B* = (*a_{ij}*)_{*n* × *n*}为

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, n)$$

(2)

第二步：将矩阵*B*按行相加，得到向量 $\bar{W}$ 的分量为

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(3)

第三步：将向量 $\bar{W} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \cdots, \bar{W}_n]^T$ 正规化，得到权重向量*W*的分量为

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(4)

第四步：计算判断矩阵*A*的最大特征根 $\lambda_{\max}$ 为

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n (AW)_i}{(nW)_i} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

(5)

式中：(*AW*)_{*i*}为向量*AW*的第*i*分量。

第五步：对判断矩阵*A*进行一致性检验：一致性指标为 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ ，一致性比例为 $CR = \frac{CI}{RI}$ ，其中，*n*为判断矩阵的阶数、*RI*为平均随机一致性指标，可通过表2查得。一般情况下，一致性比例*CR*愈小，判断矩阵的一致性愈好。当*n* < 3时，判断矩阵永远具有完全一致性；当*CR* < 0.10时，认为判断矩阵具有可接受的一致性，否则需要重新调整判断矩阵。

表2 判断矩阵 RI 取值	
<i>n</i>	<i>RI</i>
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

2 评估模型的建立

结合飞参数据以及层次分析法等相关内容建立的发动机综合性能评估模型如图1所示。

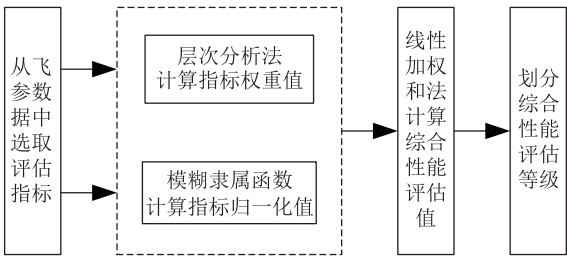


图1 发动机综合性能评估模型

2.1 指标选取与层次分析结构建立

为了能够准确、全面地反映发动机的综合性能,评估指标的选取必须遵循科学性与实用性、系统性与可操作性的原则。文献[5]按工作参数和寿命参数选取评估指标,文献[6]按动力性能、经济性能和可靠性能等选取评估指标,这些方法虽然都有一定的参照标准,但是忽略了发动机在不同的工作状态下性能参数的评价准则不同,且不同工作状态对发动机综合性能的影响不同。所以本文选取发动机的 5 种工作状态:停车状态、慢车状态、巡航状态、最大状态和加力状态作为发动机综合性能评估的准则层。根据飞参系统记录的发动机性能参数以及提取的特征参数^[7],对其进行划分归类进而组成各指标层。

停车状态指标:部件变化效率特征参数 p , 结构磨损特征参数 r ; 慢车状态指标:排气温度 T_4 , 高压转子转速 N_2 , 部件变化效率特征参数 p , 滑油附件效率特征参数 E ; 巡航状态指标:排气温度 T_4 , 高压转子转速 N_2 , 机匣振动 B , 部件变化效率特征参数 p ; 最大状态和加力状态指标:排气温度 T_4 , 高压转子转速 N_2 , 机匣振动 B , 部件变化效率特征参数 p , 转差率 s 。具体层次分析结构如图 2 所示。

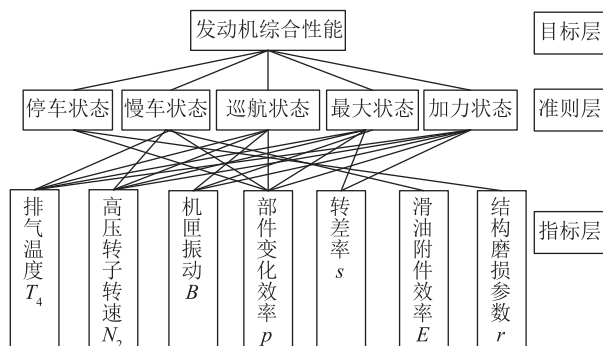


图2 发动机综合性能评估层次分析结构图

2.2 评估指标权重计算

结合该型发动机的工作经验,采用表1中的9/9~9/1标度中“同等重要”到“强烈重要”区分各指标相对重要性,建立准则层5种工作状态相对发动机综合性能的判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 7/9 & 5/9 & 4/9 & 3/9 \\ 9/7 & 1 & 7/9 & 6/9 & 5/9 \\ 9/5 & 9/7 & 1 & 8/9 & 6/9 \\ 9/4 & 9/6 & 9/8 & 1 & 7/9 \\ 9/3 & 9/5 & 9/6 & 9/7 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

采用和积法求解该判断矩阵,根据式(1)~(5)求

得判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 5.0054$, 一致性指标 $CI = (5.0054 - 5)/(5 - 1) = 0.00135$, 查表2可得 $n = 5$ 时, $RI = 1.12$, 则一致性比例

$$CR = \frac{0.00135}{1.12} = 0.0012 < 0.10$$

由此可知,判断矩阵具有满意一致性,算出准则层元素对发动机综合性能的相对权重如表3所示。

表3 准则层各元素相对目标层权重表

元素	权重
停车状态	0.109
慢车状态	0.155
巡航状态	0.201
最大状态	0.234
加力状态	0.301

同理,可算出指标层各元素相对于准则层各元素的权重值,以巡航状态为例其各指标元素相对权重如表4所示。

表4 巡航状态各指标元素相对权重表

元素	权重
T_4	0.183
N_2	0.183
B	0.254
p	0.380

设向量 $V_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 分别代表准则层各工作状态下指标元素相对于目标层的权重向量,则由表3和表4可以计算得到巡航状态各指标元素相对于目标层的权重向量

$$V_3 = 0.201 \cdot [0.183 \quad 0.183 \quad 0.254 \quad 0.380]^T \\ = [0.037 \quad 0.037 \quad 0.051 \quad 0.076]^T$$

同理,求得准则层中其他工作状态的指标层元素相对于目标层发动机综合性能的权重向量为

$$V_1 = [0.048 \quad 0.061]^T; \\ V_2 = [0.026 \quad 0.026 \quad 0.047 \quad 0.056]^T; \\ V_4 = [0.033 \quad 0.033 \quad 0.042 \quad 0.073 \quad 0.053]^T; \\ V_5 = [0.043 \quad 0.043 \quad 0.054 \quad 0.094 \quad 0.067]^T.$$

2.3 评估指标的归一化

本文采用模糊隶属函数对评估指标进行归一化处理,当模糊隶属函数值越接近1时性能越好,而越接近0时性能越差。结合发动机评估指标的性质与特点,

采用图3所示的三角分布型和梯形分布型两种直线形式的隶属函数。三角分布型直线形式的隶属函数归一化处理,得

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{a - x_{\min}} & x_{\min} \leq x < a \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - a} & a \leq x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: a 为评估指标最佳值。

梯形分布型直线形式的隶属函数归一化处理,得

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - x_{\min}}{a - x_{\min}} & x_{\min} \leq x < a \\ 1 & a \leq x \leq b \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - b} & b < x \leq x_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: (a, b) 为评估指标的最佳值域; $x_{\min}, x_{\max}$ 为评估指标的极限值。

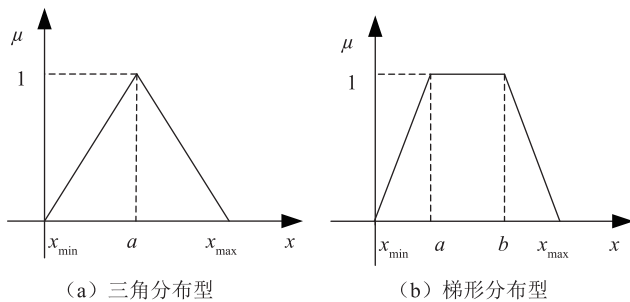


图3 三角分布型与梯形分布型模糊隶属函数

以巡航状态的排气温度 T_4 为例,由发动机工作状态主要参数要求可知,其最佳工作值为 590°C ,最低为 460°C ,最高为 750°C ,越接近 590°C 说明巡航状态排气温度性能越好。则根据图3中三角分布型隶属函数可得在巡航状态下 T_4 的归一化函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - 460}{590 - 460} & 460 \leq x \leq 590 \\ \frac{750 - x}{750 - 590} & 590 \leq x \leq 750 \end{cases} \quad (9)$$

以巡航状态的高压转子转速 N_2 为例,由发动机工

作状态主要参数要求可知,其在巡航状态的最佳工作范围是 $85\% \sim 90\%$,最低为 74% ,最高为 100% ,当 N_2 偏离最佳工作范围趋于最低或最高值时,说明巡航状态 N_2 性能可能下降。则根据图3中梯形分布型隶属函数给出巡航状态下 N_2 的归一化函数为

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x - 74}{85 - 74} & 74 \leq x < 85 \\ 1 & 85 \leq x \leq 90 \\ \frac{100 - x}{100 - 90} & 90 < x \leq 100 \end{cases} \quad (10)$$

同理,其他工作状态下各评估指标的归一化函数可用同样方法求得。

以某台发动机2018年5月5日飞行架次为例,选择各工作状态时间内的状态稳定区间,取10s相应指标元素数值的平均值,通过相应的隶属函数对其进行归一化处理。设得到的各工作状态相应指标元素归一化后组成的行向量分别为 $Z_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$,则算得该架次各工作状态下评估指标元素归一化后向量分别为

$$Z_1 = [0.988, 1];$$

$$Z_2 = [0.907, 1, 0.986, 1];$$

$$Z_3 = [0.996, 0.837, 0.933, 0.963];$$

$$Z_4 = [0.526, 0.752, 0.816, 0.925, 0.984];$$

$$Z_5 = [0.613, 0.756, 0.792, 0.950, 1]。$$

2.4 综合性能评估值计算

采用线性加权和法计算该型发动机综合性能评估值,得出其计算公式如式(11)所示。

$$U = \sum_{i=1}^5 Y_i = \sum_{i=1}^5 Z_i V_i \quad (11)$$

式中: U 为该型发动机综合性能评估值,且 $U \in (0, 1)$; $Y_i = Z_i V_i$,其中 $Y_1 \sim Y_5$ 分别代表发动机停车、慢车、巡航、最大和加力这5种工作状态的性能评估值。当 U 值越接近1,表明发动机综合性能越好,当 U 值越接近0,表明发动机综合性能越差。根据 U 值的大小,可分为优秀、良好、合格、异常和故障共5种性能评估等级,如表5所示。

表5 发动机综合性能评估等级

评估等级	U 值范围	安全性描述	危险性描述
优秀	$0.85 < U \leq 1$	性能指标正常,发动机很安全	故障可能性很小
良好	$0.70 < U \leq 0.85$	性能指标合格,发动机比较安全	故障可能性较小
合格	$0.60 < U \leq 0.70$	性能指标基本合格,处于临界边缘,发动机不太安全	故障可能性在可接受范围内
异常	$0.40 < U \leq 0.60$	性能指标不合格,超出正常范围,发动机不安全	故障可能性较大需尽快排查维修
故障	$0 \leq U \leq 0.40$	性能指标严重超出正常范围,发动机很不安全	故障风险很大必需立刻维修

综上,把权重向量 $V_1 \sim V_5$ 以及算得的某台发动机 2018 年 5 月 5 日飞行架次发动机各工作状态下评估指标归一化后的行向量 $Z_1 \sim Z_5$ 代入式(8),算得某台发动机该架次的发动机综合性能评估值为

$$\begin{aligned} U &= Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 \\ &= Z_1 V_1 + Z_2 V_2 + Z_3 V_3 + Z_4 V_4 + Z_5 V_5 \\ &= 0.108 + 0.152 + 0.189 + 0.196 + 0.258 \\ &= 0.903 \end{aligned}$$

由此可知某台发动机在 2018 年 5 月 5 日飞行架次的停车、慢车、巡航、最大和加力状态的性能评估值分别为 0.108, 0.152, 0.189, 0.196 和 0.258, 其综

合性能评估值为 0.903。根据表 5 可知,该台发动机该架次综合性能评估等级为优秀,各项性能指标都正常,故障可能性很小,可以执行各项任务。经实际检查测试,其整体工作状态正常与评估结果一致。

3 实例应用

选取某部队 10 台该型发动机作为实验发动机,分别编号为 101, 102, 103, ..., 110, 选取 2018 年 2 月 3 日或相近日期的飞行架次,利用上述方法经过计算得到这 10 台发动机综合性能和各工作状态性能的评估值如表 6 所示。

表 6 编号 101 - 110 发动机性能评估值

编号	评估等级	综合评估值		停车状态		慢车状态		巡航状态		最大状态		加力状态	
		排序	U	排序	Y_1	排序	Y_2	排序	Y_3	排序	Y_4	排序	Y_5
101	优秀	3	0.914	6	0.100	4	0.146	6	0.181	2	0.218	3	0.269
102	优秀	2	0.928	3	0.107	5	0.141	1	0.187	3	0.216	2	0.277
103	良好	6	0.815	5	0.104	7	0.111	2	0.185	6	0.183	6	0.232
104	优秀	5	0.874	1	0.109	2	0.148	7	0.177	5	0.203	5	0.237
105	异常	10	0.574	10	0.061	10	0.092	10	0.118	10	0.134	9	0.169
106	优秀	4	0.901	4	0.106	1	0.149	4	0.182	4	0.210	4	0.254
107	良好	7	0.790	9	0.074	6	0.128	3	0.182	8	0.179	7	0.227
108	合格	9	0.644	8	0.075	9	0.096	9	0.156	9	0.152	10	0.165
109	优秀	1	0.942	2	0.108	3	0.147	5	0.182	1	0.223	1	0.282
110	良好	8	0.754	7	0.082	8	0.097	8	0.167	7	0.182	8	0.226

由表 6 可知,编号 101, 102, 104, 106 和 109 的五台发动机的综合性能评估等级为优秀,整机状况非常良好,故障可能性很小;编号 103, 107 和 110 的三台发动机的综合性能评估等级为良好,发动机比较安全,其中编号 103 发动机的慢车状态性能评估值偏低,

编号 107 发动机的停车状态性能评估值偏低;编号 105 和 108 的两台发动机的综合性能评估等级分别为异常和合格,发动机不安全,需要及时对发动机的可能性故障进行排查。根据该部队装备问题报表,部分故障得到提前预测如表 7 所示。

表 7 部分发动机维修记录

编号	评估等级	发现时间	问题现象	问题原因	排除方法
103	良好	20110609	柔轴底座渗漏滑油	柔轴底座密封性不好	更换故障件
105	异常	20110206	低压一级 16#叶片有轻微变形	吸入不明微小异物	修理
107	良好	20110514	进气温度传感器中测量电阻为无穷大	温度传感器老化	更换故障件
108	合格	20110422	喷口加力燃油调节器接头漏油	密封胶圈破损、断裂	更换零组件

由表 7 可知,编号 103 发动机随后查出柔轴底座渗漏滑油问题,滑油压力直接影响发动机的滑油附件

效率特征参数 E ,而只有发动机慢车状态包含滑油附件效率 E 这个评估指标,这与编号 103 发动机的慢车

状态性能评估值偏低结果一致；编号 105 发动机经检查发现：其低压叶片有轻微变形，这可能导致高低压转子转速以及转差率出现异常，进而导致其他参数发生变化，这与编号 105 发动机整体性能评估值都偏低结果一致；编号 107 发动机随后检查出进气温度传感器老化问题，进气口温度影响发动机喷口直径，进而影响发动机部件效率变化特征参数 p ，而特征参数 p 是发动机停车状态的主要评估指标，这与编号 107 发动机的停车状态性能评估值偏低结果一致；编号 108 发动机随后排查出喷口加力燃油调节器漏油，这对发动机加力状态的排气温度、转子转速等参数产生很大影响，而发动机加力状态在其综合性能评估中相对权重值最大，这与编号 108 发动机加力状态评估值偏低并且综合性能评估值偏低结果一致。

4 结论

基于飞参数据，综合利用 AHP 法、模糊隶属函数法和线性加权和法建立了某型发动机综合性能评估模型，并通过实例进行了验证分析，为发动机综合性能评估问题提供了一种有效的尝试。通过计算得出量化的发动机综合性能评估值并将其划分为五种不同的评估等级，能够在某种程度上体现发动机的故障隐患和性能发展趋势，可为发动机状态监控和趋势预测提供重要的参考依据。

参考文献

- [1] Hsu Y L, Lee C H, Kreng V B. The Application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in Lubricant Regenerative

Technology Selection[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37: 419-425.

- [2] 胡金海, 谢寿生. 基于遗传算法的发动机性能监控与故障诊断[J]. 推进技术, 2003, 24(3): 198-200.
- [3] 胡金海, 谢寿生, 胡剑锋, 等. 基于粗糙集理论的航空发动机性能综合评判[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 704-707.
- [4] Saaty T L. The Analytic Hierarchy Process [M]. McGraw Hill, Inc., 1980.
- [5] 王梦琦, 王端民, 杨雪. 基于改进模糊综合评判法的航空发动机状态评估[J]. 润滑与密封, 2011, 36(1): 80-84.
- [6] 张志强, 徐斌, 何勇灵, 等. 基于 AHP 评价方法的发动机性能评价[J]. 兵工学报, 2008, 29(5): 625-628.
- [7] 胡金海, 钱坤, 丁健, 等. 表征某型发动机工作状况的特征参数研究[J]. 燃气涡轮实验与研究, 2005, 18(1): 27-30.

收稿日期: 2019-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51505491)

作者简介



高峰(1967-), 女, 山东莱阳人, 副教授, 主要研究方向为仪器仪表、数字信号处理、故障诊断等。1990年毕业于南京航空航天大学获得工学学士学位, 2005年毕业于空军工程大学获得工学硕士学位, 现为海军航空大学青岛校区副教授先后完成军内外科研项目30余项, 获得军队科技进步奖10余项, 在《仪器仪表学报》、《电子测量与仪器学报》等期刊发表学术论文100余篇。