

文章编号:1674-8190(2018)03-418-06

基于 PSO-ELM 的军用飞机维修保障系统效能评估研究

涂刚¹, 郭基联², 周义蛟²

(1. 中国人民解放军驻西飞公司军事代表室, 西安 710089)

(2. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

摘要: 维修保障系统效能评估是军用飞机精细化、规范化管理的一项重要措施,科学的维修保障系统效能评估是精细化保障的基础,是提升战斗力的保证。针对军用飞机的维修保障系统效能评估问题,在总结军用飞机维修保障系统效能评估体系的基础上,提出基于粒子群优化极限学习机算法(PSO-ELM)的维修保障系统效能评估模型;并通过实例进行验证。结果表明:该算法应用于军用飞机维修保障系统的效能评估是可行的,可为军用飞机维修保障效能评估提供借鉴。

关键词: 军用飞机;维修保障系统;效能评估;粒子群优化算法;极限学习机

中图分类号: V267; V271.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.017

A Study on Effectiveness Evaluation of Military Aircraft Maintenance Support System Based on PSO-ELM

Tu Gang¹, Guo Jilian², Zhou Yijiao²

(1. The PLA's Office in XAC, Xi'an 710089, China)

(2. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Effectiveness evaluation of maintenance support system is one of the most important measures in the fine and standardized management of military aircraft. A scientific effectiveness evaluation of maintenance support system is the foundation of fine protection and the guarantee of improving the fighting capacity. Targeted at the issue of the maintenance support system effectiveness evaluation of the military aircraft, the thesis firstly summarized effectiveness evaluation systems of maintenance support system, and a effectiveness evaluation model is proposed based on PSO-ELM. Finally, the feasibility of the method is verified through analysis, which can provide reference for the effectiveness evaluation of maintenance support of military aircraft.

Key words: military aircraft; maintenance support system; effectiveness evaluation; particle swarm optimization algorithm; extreme learning machine

0 引言

维修保障工作是航空装备综合保障体系的重要指标,是装备恢复完好以及战斗力生成的重要保

证^[1-2]。维修保障效能评估是对维修保障系统在实际使用中,满足装备的维修保障要求程度的衡量,其高低直接决定了航空装备的可用度^[3-4]。随着科学技术的发展,航空装备的自身结构和相关技术也越来越复杂,航空装备维修保障要实现规范化和科学化的决策与管理,必须进行维修保障效能评估,从而提高航空装备的保障质量。

目前,国外已经就装备维修保障能力开展了广泛深入地研究,且已十分成熟,尤其是美国国防部

收稿日期:2018-06-22; 修回日期:2018-07-09

基金项目:国家自然科学基金(71501185)

通信作者:周义蛟,1311158862@qq.com

一直将装备维修保障效能评估作为研究的重点领域,并开发了 LCOM 等具有代表性的维修保障效能评估仿真系统,有效地将基地级的各种维修保障资源相互联系起来,用于装备评估和分析仿真^[5-6];英国开发了 OPUS10 系统仿真软件,用于装备维修保障问题之间的权衡和决策。相比较国外,国内也积极开展装备保障能力评估和优化研究,孟雪松等^[7]以保障性的定义为基础,提出了航空装备保障性评估体系;武昌等^[8]给出了维修保障系统效能的定义,即在规定的条件和条件下完成规定的维修保障任务的能力,并应用多种方法进行了空军通信导航维修保障系统效能评估;张涛^[9]、王东南^[10]、张建军^[11]分别开展了装备使用阶段和作战单元维修保障能力评估研究,开发了装备使用阶段维修保障能力评估系统软件,并研究了考虑维修保障模式下的作战单元战备完好性和任务成功性的模型建立。

综上所述,关于维修保障问题的研究方法较多,并各有侧重点。本文根据军用飞机维修保障的整体工作流程,采用极限学习机(Extreme Learning Machine,简称 ELM)算法进行装备维修保障系统效能评估建模,并通过粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,简称 PSO)进行 ELM 参数优化,以保证维修保障系统效能评估的准确性,旨在为提升航空装备的维修保障能力和科学化管理提供理论依据。

1 军用飞机维修保障系统效能评估指标体系

军用飞机维修保障系统效能取决于军用飞机保障特性和保障系统两个方面。军用飞机的各类保障特性反映了对保障的需求,同时,保障系统中各维修保障资源的水平决定着保障能力的好坏。因此,可选取实际的维修保障资源水平与编制所要求的维修保障资源水平的比值作为军用飞机维修保障系统效能评估的部分指标。此外,维修保证系统效能评估指标还与维修管理的指标相关,例如装备返修率等。

本文在借鉴国内外相关研究^[12-13]的基础上,给出军用飞机维修保障系统效能评估指标,如图 1 所示。

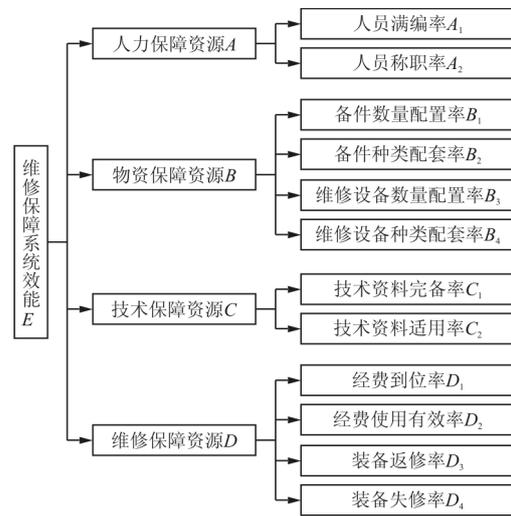


图 1 军用飞机维修保障系统效能评估指标体系
Fig. 1 Performance evaluation index system of military aircraft maintenance support system

2 基于 PSO-ELM 的军用飞机维修保障效能评估建模

2.1 ELM 算法

ELM 算法是一种新型前馈神经网络,包含一个隐含层,具有极快的学习效率、误差小等优点,受到了广泛关注^[14-15],其结构如图 2 所示。

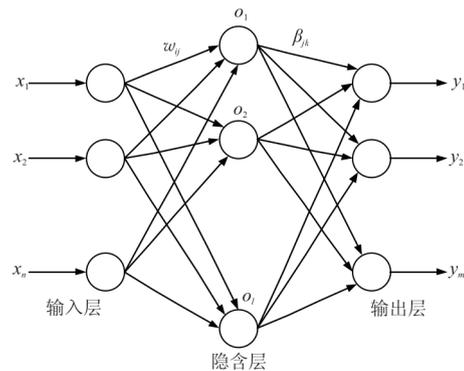


图 2 ELM 算法结构图
Fig. 2 ELM algorithm structure diagram

假设对于 N 个各不相同的样本 (x_i, y_i) ,输入矩阵为 \mathbf{X} ,输出矩阵为 \mathbf{Y} ,输入层到隐含层的权值矩阵为 \mathbf{w} ,隐含层到输出层的权值矩阵为 $\mathbf{\beta}$,隐含层节点的偏差值为 \mathbf{b} 。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1Q} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nQ} \end{bmatrix}_{n \times Q} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1Q} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2Q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mQ} \end{bmatrix}_{m \times Q} \quad (2)$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{l1} & w_{l2} & \cdots & w_{ln} \end{bmatrix}_{l \times n} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{l1} & \beta_{l2} & \cdots & \beta_{lm} \end{bmatrix}_{l \times m} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_l]^T \quad (5)$$

则根据图 2 可得:

$$\mathbf{T} = [t_1, t_2, \dots, t_Q]_{m \times Q}$$

$$t_j = \begin{bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \\ \vdots \\ t_{mj} \end{bmatrix}_{m \times 1} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^l \beta_{i1} g(\omega_i x_j + b_i) \\ \sum_{i=1}^l \beta_{i2} g(\omega_i x_j + b_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^l \beta_{im} g(\omega_i x_j + b_i) \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad (j = 1, 2, \dots, Q) \quad (6)$$

式(6)可简化为

$$\mathbf{H}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{T} = \mathbf{Y} \quad (7)$$

式中: \mathbf{H} 为隐含层的输出矩阵,在极限学习机中,输出权值和隐含层偏差值在初始时随机给定,则 \mathbf{H} 变成一个确定的矩阵; $\boldsymbol{\beta}$ 可根据最小二乘法求出。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{H}^+ \mathbf{Y} \quad (8)$$

式中: \mathbf{H}^+ 为 \mathbf{H} 的 Moore-Penrose 广义逆。

2.2 PSO 优化算法

PSO 算法是一种基于群体迭代的启发式全局搜索算法^[16-17],其具体流程如图 3 所示。

设搜索空间为 G 维,粒子总数为 p ,则第 i 个粒子位置为向量 $\mathbf{D}_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iG}]^T$,将 \mathbf{D}_i 代入适应度函数可得第 i 个粒子的适应度函数值;设第 i 个粒子的移动速度为 $\mathbf{V}_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iG}]^T$,最优位置为 $\mathbf{Z}_i = [z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iG}]^T$,种群最优位置为 $\mathbf{Z}_e = [z_{e1}, z_{e2}, \dots, z_{eG}]^T$ 。则可得在迭代寻优的过程中,粒子的位置变化公式:

$$\begin{cases} v_{ig}^{k+1} = \omega \cdot v_{ig}^k + a_1 \cdot \text{rand}(z_{ig}^k - d_{ig}^k) + \\ \quad a_2 \cdot \text{rand}(z_{eg}^k - d_{ig}^k) \\ x_{ig}^{k+1} = x_{ig}^k + v_{ig}^{k+1} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i \in [1, p]$; $g \in [1, G]$; k 为迭代次数; a_1 和 a_2 为加速因子,一般情况下取值为 $0 \sim 2$; rand 为 $0 \sim 1$ 的两相互独立的随机数; ω 为惯性权重。

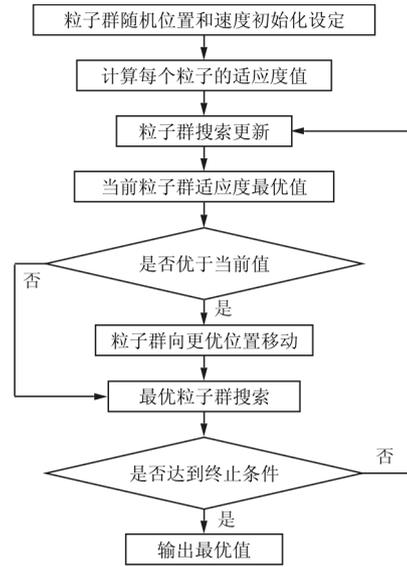


图 3 PSO 优化算法流程图

Fig. 3 PSO Optimization Algorithm Structure Diagram

2.3 评估模型建立

通过上述分析可知,利用 ELM 算法进行维修保障系统效能评估时,影响拟合误差大小的主要因素有两个:输入权值矩阵和隐含层偏差。在实际应用中,为了达到理想的精度要求,ELM 可能会需要大量的隐含层节点,即泛化能力不足。针对该问题,本文采用 PSO 算法进行输入层权值和隐含层偏差值的寻优,从而得到最优的学习网络;利用 PSO 优化上述两个主要参数的关键是确定适应度函数,本文采用 K 折交叉验证算法的思想,将平均均方根误差(RMSE)作为适应度值,以更新粒子群的最优位置。算法将军用飞机维修保障系统的各指标原始数据分成 K 组,其中 $(K-1)$ 组作为训练集,剩余一组作为测试集,得到 K 个 ELM 回归模型,并将 K 个模型均方根误差的平均值作为适应度值。则军用飞机维修保障系统效能评估模型流程如图 4 所示。

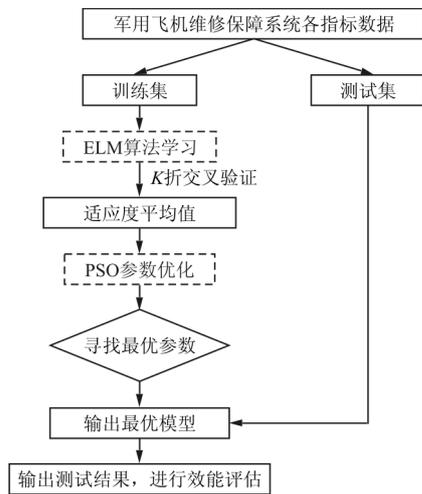


图 4 军用飞机维修保障系统效能评估模型
Fig. 4 Evaluation model of effectiveness of military aircraft maintenance support system

3 实例分析

本文通过分析军用飞机维修保障现状,并咨询参考专家实际经验,共收集整理了 24 组某型军用飞机历次维修保障系统效能的相关数据,对样本进行归一化处理,数据如表 1 所示。

采用 10 折交叉验证,即 $K=10$,设粒子群数为 40,隐含节点数为 20,迭代次数为 100 次, $a_1=a_2=1.5$,并随机选取样本 4、8、12、16、20 和 24 作为测试集,其余 18 组作为训练集。预测结果如图 5 所示。

基于 ELM 的军用飞机维修保障系统效能评估模型如图 6 所示。

表 1 某军用飞机维修保障系统效能数据

Table 1 A military aircraft maintenance support system performance data

序号	A_1	A_2	B_1	B_2	B_3	B_4	C_1	C_2	D_1	D_2	D_3	D_4	E
1	0.831	0.799	0.810	0.852	0.756	0.803	0.862	0.876	0.915	0.841	0.041	0.033	0.848
2	0.911	0.852	0.836	0.867	0.742	0.810	0.921	0.933	0.954	0.852	0.032	0.020	0.915
3	0.826	0.810	0.784	0.795	0.764	0.799	0.886	0.891	0.910	0.846	0.092	0.062	0.787
4	0.830	0.812	0.768	0.784	0.751	0.769	0.875	0.882	0.899	0.832	0.100	0.071	0.725
5	0.936	0.881	0.876	0.881	0.854	0.872	0.924	0.941	0.912	0.899	0.021	0.016	0.953
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	0.856	0.821	0.833	0.846	0.767	0.824	0.882	0.879	0.920	0.853	0.038	0.029	0.886
23	0.821	0.784	0.764	0.769	0.748	0.754	0.864	0.879	0.910	0.834	0.110	0.083	0.699
24	0.845	0.853	0.840	0.861	0.764	0.812	0.893	0.902	0.899	0.872	0.030	0.026	0.867

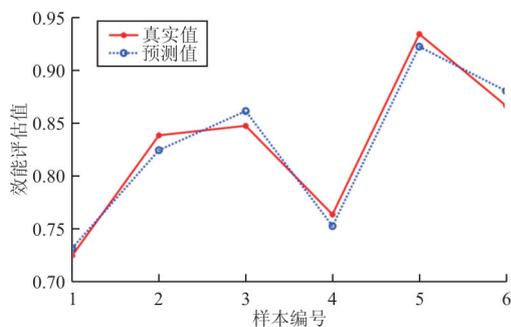


图 5 基于 PSO-ELM 的预测结果对比图
Fig. 5 A comparison diagram of prediction results based on PSO-ELM

从图 5 可以看出:基于 PSO-ELM 的军用飞机维修保障系统效能评估模型的预测值和真实值偏差很小,均方误差为 0.000 150 33,决定系数为

0.968 11,表明该方法具有较强的逼近能力,即该模型能较为精确地用于军用飞机维修保障系统效能评估。

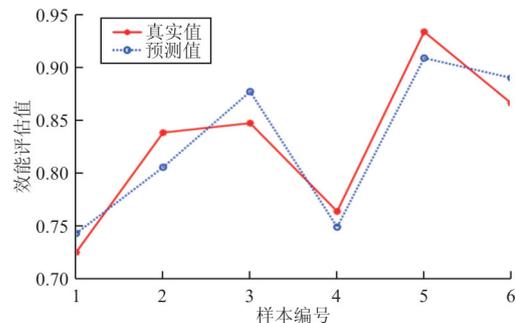


图 6 基于 ELM 的预测结果对比图
Fig. 6 A comparison diagram of prediction results based on ELM

从图6可以看出:该模型均方误差为0.000 623 17,决定系数为0.869 68。

与图5对比可见,本文所用的基于PSO-ELM的效能评估模型更为准确,具有较强的泛化和推广能力,可为军用飞机维修保障效能评估提供借鉴。

4 结束语

本文提出了基于粒子群优化极限学习机算法(PSO-ELM)的军用飞机维修保障系统效能评估算法,该算法具有较强的逼近能力,相较于ELM算法又具有较强的泛化和推广能力,能够科学有效地进行军用飞机维修保障系统的效能评估,为军用飞机维修保障效能评估提供借鉴。

参考文献

- [1] 祝华远,贾向军,孙明礼,等. 军用飞机维修保障系统综合评估方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(7): 37-39.
Zhu Huayuan, Jia Xiangjun, Sun Mingli, et al. Evaluation method of battleplan maintenance support system[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2014, 35(7): 37-39. (in Chinese)
- [2] 杨晶,黎放,狄鹏. 改进BP网络的舰船装备保障资源保障能力评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 35-71.
Yang Jing, Li Fang, Di Peng. Support ability evaluation of ship equipment supportability resources based on improved BP network[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(2): 35-71. (in Chinese)
- [3] 刘刚,王远达. 飞机定检周期变化对维修保障效能影响的仿真研究[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4): 412-416.
Liu Gang, Wang Yuanda. Research on effectiveness evaluation of aircraft maintenance and optimization of the cycle of periodic maintenance[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(4): 412-416. (in Chinese)
- [4] 敬军. 国内装备维修保障资源优化技术研究综述[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(4): 116-122.
Jing Jun. Optimization techniques for equipment maintenance support resources in china; a literature review[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(4): 116-122. (in Chinese)
- [5] Sherbrooke C C. Vari-metric: improved approximations for multi-indenture, multi-echelon availability models[J]. Operations Research, 1986, 34(2): 311-319.
- [6] Jennifer A B, Kellie L D. An analysis of air mobility express requirements operating within a lean logistics wartime environment[R]. AFIT/GTM/LAL/96S-1, USA: 1997.
- [7] 孟雪松,章引平. 浅谈航空装备保障性参数体系[J]. 航空标准化与质量, 1997, 3: 40-44.
Meng Xuesong, Zhang Yinping. A primary study on the parameter system of aviation equipment supportability[J]. Aviation Standardization and Quality, 1997, 3: 40-44. (in Chinese)
- [8] 武昌,赵海波. 空军通信导航装备维修保障系统效能评估初探[C]//全军武器装备维修保障技术研讨会论文集. 长沙, 2002: 299-304.
Wu Chang, Zhao Haibo. Study on effectiveness evaluation of air force communication navigation equipment maintenance support system[C]// Proceedings of Military Equipment Maintenance and Support Technology Symposium. Changsha, 2002: 299-304. (in Chinese)
- [9] 张涛. 装备使用阶段维修保障能力评估建模与分析[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
Zhang Tao. Modeling and analysis of maintenance support capability assessment of equipment in the usage phase[D]. Changsha: National Defense Technology University, 2004. (in Chinese)
- [10] 王东南. 面向任务的维修保障能力评估建模与仿真技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
Wang Dongnan. Modeling and simulation of task-oriented evaluation of maintenance support capability[D]. Changsha: National Defense Technology University, 2005. (in Chinese)
- [11] 张建军. 作战单元维修保障能力评估与优化技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.
Zhang Jianjun. Study on combat unit maintenance capability evaluation and optimization technology[D]. Changsha: National Defense Technology University, 2008. (in Chinese)
- [12] 王术新,王猛. 舰船柴油机维修保障效能分析及评估研究[J]. 船舶工程, 2011, 33(2): 48-51.
Wang Shuxin, Wang Meng. Analysis and evaluation of maintenance support effectiveness of marine diesel engine[J]. Marine Engineering, 2011, 33(2): 48-51. (in Chinese)
- [13] 王文秀,贾向军,孙鲁青. 灰色聚类法在航空装备维修保障能力评估中的应用[J]. 航空维修与工程, 2012, 6: 78-79.
Wang Wenxiu, Jia Xiangjun, Sun Luqing. Application of grey clustering method in aircraft maintenance supportability evaluation[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2012, 6: 78-79. (in Chinese)
- [14] 张夏阳,黄其青,殷之平,等. 基于GA-ELM的飞行载荷参数识别[J]. 航空维修与工程, 2012, 6: 78-79.
Zhang Xiayang, Huang Qiqing, Yin Zhiping, et al. Establishing a parametric flight loads identification method with GA-ELM model[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2012, 6: 78-79. (in Chinese)
- [15] 王杰,毕浩洋. 一种基于粒子群优化的极限学习机[J]. 郑州大学学报: 理学版, 2013, 45(1): 100-104.
Wang Jie, Bi Haoyang. A new extreme learning machine optimized by PSO[J]. Journal of Zhengzhou University: Natural Science Edition, 2013, 45(1): 100-104. (in Chinese)

- nese)
- [16] 杨梅花, 夏露, 张欣, 等. 基于粒子群和人工蜂群混合算法的气动优化设计[J]. 航空工程进展, 2017, 8(2): 182-189. Yang Meihua, Xia Lu, Zhang Xin, et al. Aerodynamic optimization design based on hybrid optimization algorithm of particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(2): 182-189. (in Chinese)
- [17] 于海夫, 薛惠峰. 粒子群算法在求解航空项目资源均衡优化问题中的应用[J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 360-365. Yu Haifu, Xue Huifeng. Application of particle swarm algorithm on resource equalization optimization of aviation project[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineer-

ing, 2015, 6(3): 360-365. (in Chinese)

作者简介:

涂刚(1975—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器可靠性、维修性、保障性工程。

郭基联(1971—)男,博士,教授。主要研究方向:飞行器可靠性、保障性、维修性工程。

周义蛟(1993—)男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器与动力作战使用保障工程和技术。

(编辑:马文静)

第二届航空保障设备发展论坛在青岛胜利召开

2018年7月26~27日,第二届航空保障设备发展论坛在青岛成功闭幕。本次论坛由中国航空航天工具协会、中国航空综合技术研究所,中国航空学会航空维修工程专业分会联合主办,海军航空大学青岛校区、《航空工程进展》编辑部、中国电子科技集团公司第四十一研究所、青岛中汽特种汽车有限公司、南京国睿信维软件有限公司、北京恒润天华科技有限公司、北京新兴日祥科技发展有限公司、北京蓝军电器设备有限公司协办,北京天工智合科技有限公司承办,空军装备部航装局、外场局和海军飞机办以及来自军地科研院所、军工集团、民营企业等单位180多名代表参加了此次论坛。

论坛邀请了装备发展部维修技术专业委员会组长朱胜教授、北京航空工程技术研究中心侯建副总师、航空工业沈阳飞机设计研究所刘东副总师、航空工业中国直升机研究所刘照兴副总师、航空工业第一飞机设计研究院景玉国副总师、航空工业成都飞机设计研究所戴川副总师、航空工业发展研究中心张宝珍研究员、中国航空综合技术研究所危虹副总师8位行业顶尖专家,围绕新时期保障设备未来发展、趋势以及国外先进保障设备发展经验等进行了专题演讲。

本次论坛目的就是加强航空保障设备技术领域重难点问题的研讨交流,推动航空保障设备领域军民融合创新体系建设,集中解读新形势下我国航空保障设备发展需求,以期能够搭建常态化军民融合交流平台!