تطوير نموذج متقدم لتحليل موثوقية محركات الطائرات العاملة في البيئات القاسية

نزار بن عوض الله قطان

اشراف

أ.د. بلقاسم قودة

الملخص

تعد ظاهرة تآكل الرمال منتشرة على نطاق واسع في منطقة مجلس التعاون الخليجي، حيث تسبب الجسيمات الصلبة التي تصطدم بالأسطح تلف المحرك. ومن المتوقع أن يتدهور أداء وعمر ضواغط والتوربينات المحرك بشكل كبير عند العمل في البيئات المعرضة للتآكل بسبب التعرض للرمال والأتربة. وبما أن موثوقية محركات الطائرات لها تأثير كبير على سلامة الطيران للطائرات الحديثة، فإن الصيانة الاستباقية والمتابعة المستمرة لأداء المحرك تعد من الطرق الرئيسية لتعزيز موثوقية محركات الطائرات وكفاءتها. كما يمكن استخدام مختلف نماذج الانحدار للتنبؤ بأعطال المعدات والنظم؛ ومع ذلك، هناك اهتمام متزايد بتطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية Artificial Neural Network (ANN)، والتي تتفوق في الأداء على نماذج الانحدار التقليدية، إن قدرة الشبكات العصبية على نمذجة المواقف المتعددة الأبعاد دون افتراض التبعيات المعقدة من بين المتغيرات المدخلة هي ميزة تتفوق بها على الأساليب الإحصائية التقليدية، بالإضافة إلى ذلك، تستخرج الشبكات العصبية العلاقات غير الخطية و غير الأساسية من بين بيانات المدخلات المعقدة من خلال عمليات التعلم من بيانات التدريب. كما تم استخدام نموذج تحليل الأنماط وتأثيرات الفشل Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)؛ هو نهج منهجي يستخدم لتحديد أنماط الفشل المحتملة في النظام، بالإضافة إلى الآثار المحتملة لتلك الإخفاقات ومدى احتمالية حدوثها. ويهدف هذا التحليل الى تحديد أولويات معالجة أنماط الفشل المحتملة، وذلك لوضع وتنفيذ إجراءات وقائية وتصحيحية تهدف إلى تقليل من أخطار الفشل وتخفيف عواقبه المحتملة.

تُعَدُّ معدلات التدفق وحجم الجسيمات وتركيزها مؤشرات رئيسية لتقييم معدلات التعرية التي تؤثر على شفرات الضاغط في المحركات التوربينية الغازية. وبالتالي، يمكن استخدام تحليل ديناميكيات السوائل الحاسوبية Computational Fluid Dynamics(CFD)، للتحقق من الأداء والتنبؤ بتآكل شفرات الضاغط. والحصول على معلومات مفصلة حول مجال التدفق الهوائي، بما في ذلك السرعة والضغط وتوزيع درجة الحرارة، بالإضافة إلى مسار الجسيمات في التدفق، ويمكن استخدام هذه المعلومات للتنبؤ بموقع ومعدل تآكل الشفرات وتحديد المناطق التي قد تكون عرضة بشكل خاص للتآكل. يجب التحقق أولاً من صحة محاكاة نموذج CFD بالمقارنة مع البيانات التجريبية التي تم جمعها من الاختبارات الفعلية، حيث تتم هذه العملية للتأكد من تمثيل النموذج للنظام الفيزيائي بدقة والوثوق بالنتائج. بعد التحقق من صحة النموذج، يمكن استخدامه لإجراء التحاليل الفيزيائية واستكشاف خيارات التصميم المختلفة لتقليل التعرية وزيادة عمر شفرات ضاغط المحرك. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم

موثوقية وأداء محرك تي-٥٦ لطائرة الوكهيد سي-١٣٠ هيركوليز تحت تأثير عوامل التعرية بسبب الرمال والأتربة في منطقة مجلس التعاون الخليجي. وينقسم العمل البحثي إلى خمسة أجزاء رئيسية تتضمن دراسة معايير التصميم والصيانة والتشغيل، وتحليل بيانات الأعطال وتكرارها، وتقييم موثوقية المحرك باستخدام الطرق الإحصائية، واختبار الأداء في ظروف التشغيل المحلية. كما يهدف هذا العمل البحثي إلى تحسين موثوقية وأداء المحرك وتحديد المشاكل الحالية واقتراح الحلول اللازمة لتحسين عملية الصيانة والتشغيل وتقليل التكاليف. يتنبأ الجزء الأول بمعدل فشل توربين المحرك تي-٥٦ لطائرة لوكهيد سي-١٣٠ باستخدام كل من نموذج الانحدار الوابلي analysis Weibull ونموذج التوزيع اللوغاريتمي الطبيعي Lognormal analysis. في البداية، تم توزيع البيانات في النموذج باستخدام النموذج الوابلي، وتم دعم التحقق من صحة النموذج من خلال خط مستقيم يتناسب مع البيانات المحولة. بالإضافة إلى ذلك، تمت مقارنة التحقق من صحة التحليل بنتائج الانحدار الناتجة من التحليل اللوغاريتمي lognormal باستخدام حزمة برامج Weibull++7. أشارت المقارنة إلى التوافق العالي مع البيانات التجريبية وأثبتت دقة الطريقة في تحديد متوسط الوقت بين حالات الفشل وتوصيف دقيق إلى حد ما للموثوقية. بالإضافة إلى ذلك، وباستخدام مخططات الكثافة المحتملة، وهي عبارة عن مخططات يتم استخدامها في تحليل البيانات الإحصائية لتحديد مستويات الثقة والتأكيد في النتائج، أصبح لدينا حدود واضحة للتباينات بين جميع المؤشرات ذات الصلة. كما تشير الخصائص الناتجة إلى أن معدل فشل المحرك يزداد مع مرور الوقت، مما يجعل استراتيجية الاستبدال جديرة بالاهتمام. كما ان عوامل التآكل والاجهاد والتشقق هي من الأسباب الرئيسية لفشل شفرات المحرك محل الاختبار. ونظرًا لنمط الفشل المذكور، فمن الضروري إجراء برامج صيانات قياسية لاستبدال وإصلاح التلف الناتج عن عوامل التعرية. يغطي الجزء الثاني نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) باستخدام خوارزمية التغذية للأمام والانتشار الخلفي Feed-Forward Back-Propagation Algorithm كقاعدة تعليمية للنموذج. ولهذا الغرض تم تطوير خوارزمية خاصة باستخدام برنامج MATLAB. بحيث تتكون المدخلات من البيانات الميدانية لاستخلاص نتائج معدل الفشل العام لتوربين محرك تي-٥٦. وللتحقق من صحة النتائج، قمنا بتحليل البيانات بشكل أكبر باستخدام نموذج شبكة عصبية ذات أساس شعاعي Radial Basis Neural Network, وتستخدم هذه الشبكات أساس شعاعي لتحديد وتمثيل الوزن الذي يتم استخدامه في العملية التنبؤية. كما أظهر النتائج أن معدل الفشل الذي تنبأ به نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية للتغذية إلى الأمام يتوافق بشكل أفضل مع نموذج الشبكة العصبية على أساس شعاعي مقارنة ببيانات معدلات الفشل الذي توقعه النموذج الوابلي. أخيرًا، تم التنبؤ بمعدل الفشل العام لتوربين المحرك تي-٥٦ باستخدام نموذج الشبكة العصبية الإدراكية متعددة الطبقات multilayer perceptron neural network (MLP) باستخدام برنامج DTREG. وينطوي الجزء الثالث على تقييم المخاطر وأسبقية الإجراءات التصحيحية. حيث تم تصنيف بيانات أوضاع الفشل وتحليل التأثيرات (FMEA) باستخدام تصنيف الأولوية للمخاطر Risk Priority Number (RPN). من مصفوفة FMEA، حيث تم استنتاج أوضاع الفشل الرئيسية لتوربينات المحرك تي-٥٦ والتي تؤدي للتلف الميكانيكي للمحرك بسبب الفشل الهيكلي الناجم عن عوامل مثل التعرية وابتلاع الرمال. كما توفر النتائج أيضًا تحليل مفصل لموثوقية توربين المحرك تحت الدراسة في ظل ظروف التشغيل الفعلية، والتي تمكن مشغلي الطائرات من تقييم أعطال النظام والمكونات وتخصيص خطط الصيانة التي أوصت بها الشركة المصنعة.

في الجزء الرابع، تم إجراء محاكاة عددية numerical simulation للتنبؤ بأنماط التعرية المحتملة وتوزيع الجسيمات الصلبة، وحساب معدل التعرية الناتج بسبب هذه الجسيمات التي تؤثر على شفرات ضاغط المحرك NASA Rotor 37. تم التحقق من معدل الفشل، وثبت أن تركيز الجسيمات له تأثير أكبر على معدل تآكل شفرات ضاغط المحرك، في حين أن حجم الجسيمات له أهمية أقل بين جميع المؤثرات الأخرى. يصف الجزء الخامس من الدراسة، تطوير وتطبيق نماذج لحساب تآكل السطح في المحرك التوربيني تي-٥٦. و باستخدام مسح ثلاثي الأبعاد لشفرات جديدة وأخرى تالفة (بسبب التعرية). تستخدم هذه النماذج مسارات الجسيمات لتحديد معدلات التأثير والسرعات وزوايا الاصطدام. أظهرت النتائج أن تركيز الجسيمات الصلبة في الهواء يؤثر بشكل كبير على معدل تآكل شفرات المحرك، بينما يكون لحجم الجسيمات تأثير أقل بين جميع العوامل المقاسة الأخرى. وأوضحت النتائج أيضًا أن خشونة السطح تزداد مع زيادة حجم الجسيمات. يمكن رؤية التغيرات في كثافة الإجهاد ومعدل التعرية على أسطح شفرات الضاغط على طول اتجاه التيار، مما يحاكي نمط تركيز الجسيمات الصلبة ومعدل تغير الضغط. ولاحظت الدراسة أن متوسط معدل تآكل الشفرات وكثافتها يزدادان بشكل مطرد بزيادة حجم الجسيمات الصلبة، ومع ذلك، فإن الزيادة في معدل التعرية والكثافة تتباطأ بالنسبة لأحجام الجسيمات الأكبر بكثير.

RELIABILITY AND PERFORMANCE ANALYSIS OF AIRCRAFT ENGINES OPERATION IN EROSIVE ENVIRONMENT

By Nizar Awadallah H Qattan

Supervised By
Prof. Dr. Belkacem Kada

Abstract

Sand erosion is a widespread phenomenon in the Gulf Cooperation Council (GCC) region, where a solid particle impacts a wall surface that may cause engine damage. The performance and lifespan of engine compressors and turbines are significantly expected to deteriorate when operating in an erosive environment. Aircraft engine's reliability has a significant impact on flight safety of modern aircraft. Therefore, proactive maintenance and continuous engine tracking are key methods for enhancing both aircraft reliability and efficiency. Various conventional regression models can be used to predict the failure of equipment and systems; however, there is a growing interest in the application of Artificial Neural Networks (ANN), which outperform regression models. The capacity of neural networks to model multidimensional situations without assuming complex dependencies among the input variables is an advantage over statistical methods. In addition, neural networks extract the underlying nonlinear relationships between the complex input data collected from numerous maintenance records through a process of learning from training data. (FMEA), or Failure Modes and Effects Analysis, is a systematic approach to identifying potential failure modes in a system, as well as the potential effects of those failures and the likelihood of those failures occurring. The objective of FMEA is to identify and prioritize potential failure modes in order to develop and implement preventive and corrective actions that will reduce the risk of failure and mitigate its potential consequences. Flow rate, particle size, and particle concentration are key predictors of erosion rates on and around compressor blades. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis can be used to validate the performance and predict the erosion of compressor blades in gas turbine engines. CFD simulations can provide detailed information about the flow field, including velocity, pressure, and temperature distributions, as well as the trajectory of particles in the flow. This information can be used to predict the location and the rate of blade erosion and to identify the areas of the blade that may be particularly susceptible to erosion. The CFD simulation must first be validated against experimental data, which is done by comparing the simulation results with measurements taken from an actual turbine. This validation process is important to ensure that the CFD model accurately represents the physical system and that the results can be trusted. Once validated, the CFD model can be used to perform sensitivity analysis and explore unique design options to minimize the erosion and increase the life of the compressor blades. The present study investigates the reliability and performance of a Lockheed C-130 T-56 engine operating in the corrosive environment of the Gulf Cooperation Council region. The research work is divided into five major parts.

Part 1 predicts the failure rate of the Lockheed C-130 T-56 engine turbine using both Weibull and lognormal regression models. Initially, the data were fitted into the model using two parameters Weibull analysis, validation of the Weibull model were supported by a straight-line fit to the transformed data. In addition, a validation of Weibull analysis was compared with Weibull and lognormal regression results using the Weibull++7 software package. The comparison indicated excellent agreement with experimental data and validated the accuracy of the method in determining the mean time between failures and a fairly accurate reliability characterization. In addition, using likelihood contour plots for the parameter's shape parameter and scale parameter, we have explicit boundaries for the variances of all four related parameters. The resultant characteristics indicate that the engine turbine's failure rate increases with time, making a replacement strategy worthwhile. Corrosion, erosion, fatigue, and cracking are the most prevalent reasons for failure within this range. Due to the component's wear-out failure pattern, a hard-time maintenance action consisting of a planned replacement and overhaul program is necessary. Part 2 covers the Artificial Neural Network (ANN) model utilizing the feed-forward back-propagation algorithm as a learning rule. A MATLAB code was developed for this purpose. The code takes in field data and outputs the general failure rate of the T-56 turbine. To validate our results, we have further analyzed the data by using a radial basis neural network model. The results show that the failure rate predicted by the feed-forward back-propagation artificial neural network model is in better agreement with the radial basis neural network model compared with the actual field data than the failure rate predicted by the Weibull model. Lastly, the general failure rate of the T-56 engine turbine and its six main categorical failures were forecasted using a multilayer perceptron neural network (MLP) model on DTREG commercial software. Part 3 involves the risk assessment and the primacy of corrective action. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) data were ranked using the Risk Priority Number (RPN) ranking. From the FMEA matrix, the major failure mode of the T-56 engine turbine was found to be mechanical damage due to the structural failure caused by factors like erosion and sand ingestion. The results also provide insight into the reliability of the engine turbine under actual operating conditions, which aircraft operators can utilize to assess system and component failures and customize the manufacturer-recommended maintenance plans. In Part 4, a numerical simulation was performed to predict possible erosion patterns, particle distribution, and erosion rate due to the solid particles impacting the blades of NASA rotor 37. A linear erosion cascade experiment performed on NASA rotor 37 provides validation for the failure rate. It was demonstrated that particle concentration has a more substantial effect on blade erosion rate than particle size, whereas particle size has a less significant effect among all other measured parameters. Part 5 describes the development and application of models to calculate surface erosion in T-56 turbomachinery. These models predict particle trajectories in turbomachinery passages to determine impact rates, velocities, and impact angles. For this purpose, a 3D scan of new and damaged blades (due to erosion) was made to design profile data from a T-56 first-stage compressor. The result shows that particles concentration has the most significant effect on blade erosion rate where particles size has less effect among all other measured parameters. It has explained that surface roughness increases with an increase in particle size. The changes in the wall's stress and erosion rate density can also be seen along the streamwise direction, mimicking the trends shown for particle concentration and pressure ratio. It was observed that the average blade erosion rate and density exhibit a rapid rise with the increase in particle size. However, the increase in erosion rate and density slows down for much larger particle