

基于灰色系统理论的刷式密封磨损量的预测方法

杨景尧 刘美红 宋晓磊

(昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650500)

文 摘 运用灰色预测理论,根据已有试验测得的刷丝磨损量数据,建立刷式密封刷丝磨损量的灰色预测模型,估算刷式密封件的使用寿命,并进行了试验验证。试验结果表明:灰色模型预测具有可行性且具有良好的预测精度及,3种试验工况下工作500 min时的刷式密封磨损量进行预测对比,最大相对残差为1.57%,最大绝对残差为0.16 mm³,对后续刷式密封装置的稳定运行、修理和更换具有一定的参考意义。

关键词 刷式密封,可靠性,磨损,灰色预测

中图分类号:TH17

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.06.012

Wear Prediction Method of Brush Seal Based on Grey System Theory

YANG Jingyao LIU Meihong SONG Xiaolei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract Based on wear measurement of brush seals in existing tests, grey prediction model of wear amount of brush seal is established using the grey prediction theory. The service life of the brush seal is estimated, and the test verification is carried out. The results between prediction and test show that the grey model prediction is feasible with good prediction accuracy. Comparison of the wear amount of brush seals under three conditions for 500 min shows maximum relative residual error of 1.57% and maximum absolute residual error of 0.16 mm³. The result can be used as reference for determining operation time and repair and replacement demand of future brush seal devices.

Key words Brush seal, Reliability, Wear, Gray prediction

0 引言

在系统内部因素关系、作用原理不明了下,系统被称为灰色系统^[1]。灰色预测则是灰色系统理论中根据已知的部分系统信息建立的对未来系统结果预测的一种数学模型^[2]。灰色预测采用灰色建模的方法,通过对已知的系统特征数据进行累加,弱化其他随机因素的干扰,对系统的内在规律进行研究^[3-4]。

刷式密封作为一种新型接触式动密封,其良好的封严效果使其被广泛应用于航空发动机、内燃机等透平机械中^[5-6]。刷式密封柔性刷丝尖端会与高速运转的转子产生剧烈摩擦。刷丝磨损量的大小会直接影响刷式密封的封严性能与使用寿命^[7-8]。本文运用灰色预测理论,根据已有试验测得的刷丝磨损量数据,建立刷式密封刷丝磨损量的灰色预测模型,通过对刷式密封磨损量进行预测,估算刷式密封

件的使用寿命,对后续刷式密封装置的稳定运行、修理和更换具有现实意义。

1 刷式密封磨损原理

刷式密封的柔性刷丝由于与转子按照一定角度 θ 倾斜排列,其在气游压差的作用下会改变躺角与高速运转的转子表面接触,从而引起刷丝的剧烈磨损^[9]。刷丝尖端与转子表面接触状况示意图见图1。

普遍的磨损形式主要包括为腐蚀磨损、磨料磨损以及黏着磨损。而刷式密封的工作时所处的高压气体环境使得刷丝磨损掉落的磨料会被及时带走,且气体的腐蚀磨损相较于刷丝整体磨损量占比较小^[10]。因此在研究刷式密封磨损特性时主要考虑粘着磨损的存在。刷丝的过度磨损导致的密封装置失效,不仅会影响透平机械的工作效率,严重时会影响整个透平机械的可靠性。

收稿日期:2021-08-17

基金项目:国家自然科学基金(51765024);昆明理工大学分析测试基金(2020P20183103001)

第一作者简介:杨景尧,1996年出生,硕士,主要从事流体密封技术研究。E-mail:jyao_yang@163.com

通信作者:刘美红,1973年出生,教授。E-mail:64115737@qq.com

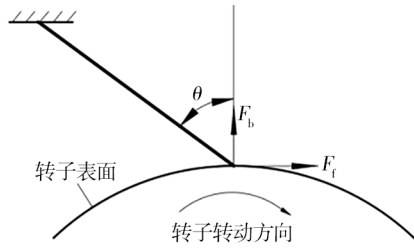


图1 刷丝与转子接触示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the contact between the brush wire and the rotor

灰色预测模型将系统中已知的随机量看作在一定幅度范围内变化的灰色量,随机过程看作灰色过程,并根据灰色系统理论中的GM(1,1)模型进行处理,综合系统中过去和现在的信息对未来进行预测^[11]。在刷式密封磨损过程中,磨损量数值是受气游压差、刷丝结构参数、转子转速等各种因素影响的随机量^[12-14]。但是已有的磨损量中也包含着一定规律,因此可以对刷式密封磨损量进行灰色预测。

2 灰色预测模型

对刷式密封磨损量进行灰色建模和预测,只有磨损量一个变量。采用GM(1,1)模型将刷式密封磨损量的原始数据累加再生成对刷式密封系统的磨损量的发展变化进行预测,其基本步骤如下。

(1)对一组原始数据序列

$$X^{(0)} = [x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)] \quad (1)$$

只对原始数列进行一次累加再生成,得到 $X^{(1)}$ 的1-AGO数列为:

$$X^{(1)} = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(k), \dots, x^{(1)}(n)] \quad (2)$$

其中:

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (3)$$

(2)生成 $X^{(1)}$ 的紧邻均值等权数列为:

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(k) | k = 1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

其中:

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)] \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

(3)由1-AGO序列求取 $X^{(1)}$ 关于时间 t 灰色微分方程为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (6)$$

其白化方程GM(1,1)为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = b \quad (7)$$

式中, a, b 为待解参数。

由灰色微分方程得出参数序列 \hat{a} 为:

$$\hat{a} = (a, b)^T \quad (8)$$

令:

$$Y_N = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由最小二乘法可得:

$$\hat{a} = [a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_N \quad (11)$$

(4)解出参数序列 \hat{a} 后,令 $x^{(1)}(0) = x^{(0)}(1)$,得到白化形式微分方程的解:

$$\widehat{x^{(1)}}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (12)$$

(5)将上述结果进行累计还原就可以得到系统的预测值:

$$\widehat{x^{(0)}}(k+1) = \widehat{x^{(1)}}(k+1) - \widehat{x^{(1)}}(k) \quad (13)$$

(6)灰色模型的预测值是对系统未来行为的一种估计值。估计值是否可靠一般通过绝对残差与相对残差两种方法对模型精度进行检验。

记 k 时刻的已知数据为 $x^{(0)}(k)$,灰色模型预测值为 $\widehat{x^{(0)}}(k)$,则绝对残差为:

$$q(k) = x^{(0)}(k) - \widehat{x^{(0)}}(k) \quad (14)$$

相对残差为:

$$Q(k) = \frac{q(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (15)$$

根据上述的绝对残差和相对残差可以判断灰色模型的预测值是否满足精度要求。

3 实例分析

将基于刷式磨损量因素的灰色预测模型GM(1,1)应用于文献[15]中的实例,3种不同试验工况下刷式密封磨损量在不同工作时长下的原始数据序列见表1。图2为测量刷式密封磨损量的试验台^[15]。

表1 刷式密封磨损量

Tab. 1 Wear of brush seal

试验 工况	磨损量 ω/mm^3			
	100 min	200 min	300 min	400 min
E1	3.14	3.63	3.72	3.74
E2	3.92	5.19	5.55	5.69
E3	10.09	11.68	11.92	11.97

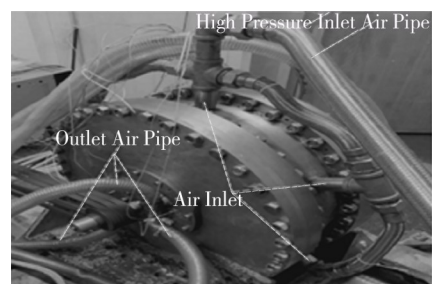


图2 刷式密封试验台

Fig. 2 Brush seal test bench

选取试验工况E1条件下的刷式密封磨损量为例,根据式(2)式(3)做一次累加生成得:

$$X^{(1)} = [3.14, 6.77, 10.49, 14.23]$$

则原始数据序列 $X^{(0)}$ 以及1-AGO数列的紧邻均值 $Z^{(1)}$ 构成的数据矩阵 Y_N 和 B 为:

$$Y_N = [3.63, 3.72, 3.74]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -4.959 & 1 \\ -8.632 & 1 \\ -12.361 & 1 \end{bmatrix}$$

通过公式(11)可接触参数序列 \hat{a} 为:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} -0.0148 \\ 3.5683 \end{bmatrix}$$

即: $a = -0.0148, b = 3.5683$ 。

从而得到灰色微分方程的白化方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} - 0.0148X^{(1)} = 3.5683$$

同时根据公式(12)得到响应函数:

$$\widehat{x^{(1)}}(k+1) = 243.655e^{0.0148k} - 240.51$$

由响应函数得到模型计算值 $\widehat{x^{(1)}}$,并对其进行累积还原得到系统的灰色预测值 $\widehat{x^{(0)}}$ 以及对模型精度进行检验的绝对残差值与相对残差值如表2所示。

表2 磨损量对比

时间 t/min	实例磨损量 /mm ³	预测磨损量 /mm ³	绝对残差 q(k)/mm ³	相对残差 Q(k)/%
100	3.14	3.14	0	0
200	3.63	3.64	0.01	0.28
300	3.72	3.70	0.02	0.54
400	3.74	3.75	0.01	0.27

由表2可见,灰色预测模型预测值与实例中所得到的刷式密封磨损量的残差分析显示模型精度良好。根据文中建立的灰色预测模型对试验工况1条件下工作时长为500 min的刷式密封磨损量的灰色预测结果为3.81 mm³。而文献[15]实例中,此时的刷式密封磨损量为3.77 mm³。灰色预测模型此时预测结果的绝对残差为0.04 mm³,相对残差为1.06%。可得出灰色预测模型的预测值有很高的预测精度。

将3种试验工况刷式密封磨损量数据与灰色预测模型的预测结果进行对比,结果如图3所示,显示灰色预测模型预测结果与实际刷式密封磨损量吻合度较高,可以进行刷式密封磨损量的预测。

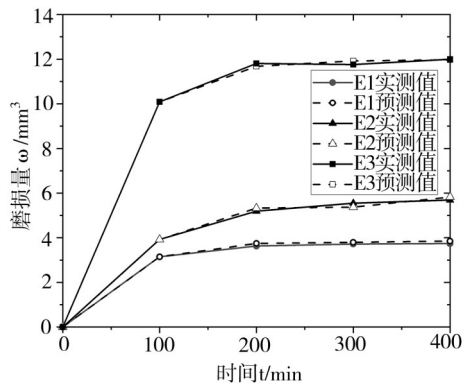


图3 磨损量对比

Fig. 3 Comparison of wear volume

通过本文建立的刷式密封磨损量灰色预测模型对刷式密封500 min时的磨损量进行预测,磨损量对比如表3所示。可见,通过灰色预测模型预测得到的预测结果与实际刷式密封磨损量进行对比,得到的

表3 磨损量对比

试验 工况	实测值 /mm ³	预测值 /mm ³	绝对残差 q(k)/mm ³	相对残差 Q(k)/%
E1	3.77	3.81	0.04	1.06
E2	5.70	5.79	0.09	1.57
E3	11.98	12.14	0.16	1.33

结果相对残差最大为1.57%,最大绝对残差为0.16 mm³。可以得出灰色预测模型的预测值具有很高的预测精度,其预测的磨损趋势符合实际的磨损规律。因此,通过灰色预测模型对刷式密封磨损量进行预测,对后续刷式密封装置的稳定运行、修理和更换具有一定的参考意义。

4 结论

本文通过建立的灰色模型得到的预测结果和已知的试验数据进行对比,结论如下:

(1)灰色模型预测结果具有良好的预测精度,证明本文建立的灰色模型对刷式密封磨损量预测具有可行性;

(2)对3种试验工况下工作500 min时的刷式密封磨损量进行预测对比,最大相对残差为1.57%,最大绝对残差为0.16 mm³,进一步验证了该模型的预测精度;

(3)灰色预测结果符合实际磨损规律,对后续刷式密封装置的稳定运行、修理和更换具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1990:4.
- [2] DENG J L. Grey system theory course [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1990:4.
- [3] 罗佑新. 灰色系统理论及其在机械工程中的应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2001:61.
- [4] LUO Y X. Grey system theory and its application in mechanical engineering [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2001:61.
- [5] 冯伟杰,张景珊,付晓琪. 灰色系统理论及其在机械工程中的应用[J]. 中国金属通报,2018(10): 144-146.
- [6] FENG W J, ZHANG J S, FU X Q. Grey system theory and its application in mechanical engineering [J]. China Metal Bulletin, 2018(10): 144-146.
- [7] [4] WU W Z, ZHANG T. An improved gray interval forecast method and its application [J]. Communications in Statistics - Theory and Methods, 2020, 49(5): 1120-1131.
- [8] [5] 陈磊. 航空发动机刷式密封泄漏性能与结构优化研究[D]. 东南大学,2019.
- [9] CHEN L. Research on leakage performance and structure optimization of aero-engine brush seal [D]. Southeast University, 2019.
- [10] [6] 李军,李志刚,张元桥,等. 刷式密封技术的研究进展[J]. 航空发动机,2019,45(02):74-84.

LI J, LI Z G, ZHANG Y Q, et al. Research progress of brush seal technology[J]. Aero Engine, 2019, 45(02): 74-84.

[7] PEKRIS M J,FRANCESCHINI G,GILLESPIE D R H. An investigation of flow, mechanical, and thermal performance of conventional and pressure-balanced brush seals [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power,2014,136(6):2141-2153.

[8] 董书娜,杜春华,崔亚辉,等. 基于 Archard模型的刷式密封单边磨损特性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(07): 1437-1446.

DONG S N, DU C H, CUI Y H, et al. Unilateral wear characteristics of brush seals based on archard model [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(07): 1437-1446.

[9] 李双喜,马钰虎,张山雨,等. 柔性丝刷式密封传热特性的数值分析与试验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(02): 133-141.

LI S X, MA Y H, ZHANG S Y, et al. Numerical and experimental investigation on heat transfer characteristics of flexible bristle brush seal[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(02): 133-141.

[10] 严豪宇. 刷式密封磨损特性及其对泄漏特性的影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.

YAN H Y. Study on the wear characteristics of brush seal and its influence on leakage characteristics [D]. Xi'an: Xi'an

University of Technology, 2020.

[11] 李钦奉,庞浩,周克秋,等. 基于灰色理论的机床润滑泵泵芯磨损可靠性预测[J]. 机床与液压, 2020, 48(07): 184-187.

LI Q F, PANG H, ZHOU K Q, et al. Reliability prediction of pump core wear of machine tool lubrication pump based on grey theory[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(7): 184-187.

[12] DOGU Y, AKSIT M F. Brush seal temperature distribution analysis[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2006, 128(3): 1237-1248.

[13] HILDEBRANDT M, SCHWARZ H, SCHWITZKE C, et al. Effects of the back plate inner diameter on the frictional heat input and general performance of brush seals[J]. Aerospace, 2018, 5(2): 1-17.

[14] ZHANG Yuanqiao, LI Jun, LI Zhigang, et al. Numerical comparison of leakage flow and rotordynamic characteristics for two types of labyrinth seals with baffles [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(9): 091008.

[15] FAN Jinjin, JI Honghu, WANG Qiang, et al. A combined theoretical and experimental study of wear model of brush seal[J]. Tribology International, 2021, 154(1): 106696.

《宇航材料工艺》征订启事

·中国科学引文数据库核心期刊·中国中文核心期刊·中国科技论文统计源期刊
·国际宇航文摘(IAA)、美国化学文摘(CA)、金属文摘(METADEx)收录核心期刊

- 《宇航材料工艺》创刊于1971年,是国内外公开发行的国家级科技期刊
- 入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网及万方数据资源系统数字化期刊群等
- 在第二届国家期刊奖评比活动中获百种重点期刊奖
- 在航空航天领域高质量科技期刊分级目录中排在T3区
- 由航天材料及工艺研究所主办
- 主要报道我国材料及工艺的科技进展、科研成果和工程实践
- 主要栏目有:专论、综述、计算材料学、新材料新工艺、测试分析、工程实践、知识窗、科技信息、成果简介以及会议信息等
- 适合于航空航天、冶金、石油化工、机械电子、轻工、汽车、造船等部门,从事材料工艺研究生产的科研技术人员、管理人员及高校师生阅读。
- 中国标准连续出版物号 CN 11—1824/V,国际标准刊号 ISSN 1007—2330,双月刊102页,国际大16开本,激光照排,逢双月出版,每期20.00元,全年120.00元。

欢迎各界读者订阅!

本刊参加了天津半导体杂志社的联合征订,可汇款至天津半导体杂志社,邮编300220,注明“订阅《宇航材料工艺》,代号9769”。也可直接在编辑部、淘宝或微店订阅。

开户银行:建行首体南路支行

账户名称:航天材料及工艺研究所

账号:2170005102(务必将订单与银行回执发至编辑部邮箱)

联系人:李编辑;电话:010-68383269,010-68383267;传真:010-68383237

编辑部邮箱:703@china.com