

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.009

基于面板数据的高速公路机电设备故障多因素预测模型研究^{*}

秦 余, 于 泉^{*}, 任广丽

(北京工业大学 北京城市协同创新中心, 北京 100124)

摘要:针对高速公路机电设备故障由多种因素引起的问题,对中国北京市2012-2013年6条高速公路每天的机电设备故障以及交通流量、平均温度、相对湿度和风速数据进行了调查,并以机电设备故障为被解释变量,从环境因素和工作负荷中选取交通流量、温度差、相对湿度和风速作为解释变量,分别建立混合回归、个体固定效应和随机效应面板数据模型。然后对数据序列进行单位根检验和协整检验,通过对3个预测模型采用F检验、豪斯曼检验,进行模型比较,选取最优模型。研究表明,个体固定效应模型较优,温度差、相对湿度和风速这些因素对机电设备故障具有显著的正效应,交通流量因素对机电设备故障具有显著的负效应;研究结果可以为高速公路机电设备的故障预测和预防性维护提供理论支持。

关键词:高速公路;机电设备;故障;面板数据;多因素;模型

中图分类号:TH39;U491

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0596-07

Multi-factor prediction model of highway electromechanical equipment faults based on panel data model

QIN Yu, YU Quan, REN Guang-li

(Beijing University of Technology, Beijing Collaborative Innovation Center for Metropolitan Transportation, Beijing 100124, China)

Abstract: Aiming at the problems caused by many factors in the mechanical and electrical equipment failure, a panel data model was developed. The electromechanical faults represented the response variable, and traffic flow, temperature difference, relative humidity, and wind speed were selected as explanatory variables. The data was based on an investigation of electromechanical equipment faults, and the above-mentioned environmental variables were collected for six highways in Beijing during 2012-2013. Panel data models for mixed regression models with individual fixed and random effects were established. A unit root test and co-integration test were performed on the data sequence. Finally, the F-test and the Hausman-test were used to compare the three prediction models and determine the optimal model. The results indicate that the individual fixed effects model is superior, positive effects of temperature, relative humidity, and wind speed on the electromechanical equipment faults are significant. Traffic flow has a significant negative effect on the electromechanical equipment faults. This results can provide theoretical support for fault prediction and inform needs for preventive maintenance of the highway electromechanical equipment.

Key words: highway; mechanical and electrical equipment equipment; failure; panel data; multiple factors; model

0 引 言

高速公路机电系统具有结构复杂、设备数量大、

种类多、分布广、技术含量高、资产性突出的特点^[1],机电系统的运行状况直接影响高速公路的运营服务水平^[2]。随着机电设备不断增多和升级,这使得在机电设备数量不断增大的同时,故障数量也在不断

收稿日期:2016-12-08

基金项目:北京市首都公路发展集团有限公司科技项目(40106001201508)

作者简介:秦余(1990-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事智能交通系统方面的研究. E-mail:s201439069@emails.bjut.edu.cn

通信联系人:于泉,男,副教授,硕士生导师. E-mail:yuquan@bjut.edu.cn

增加。

近年来,我国各个高速公路运营单位积累了大量的机电设备故障基础数据,但是并未深入研究数据中蕴含的故障规律。因此在整理和分析机电设备故障历史数据基础上,甄别高速公路机电设备故障的影响因素,建立机电设备故障的预测模型,对我国高速公路机电系统的功能保障具有重要的意义和应用价值。

一般而言,造成高速公路机电设备故障的因素包括:环境因素、交通流量、维护维修人员素质、维护维修频次、设计缺陷或选型不当、设备自然老化、设备发热、灰尘油污垢、裂纹应力变形、设备线路绝缘等多种^[3-6]。总结起来,可分为设备品牌、维护维修管理水平、使用年限、工作环境和 workload 等 5 类。其中工作环境包括温度、湿度、风速、污染物等。

近年来,国内外学者开始利用其他领域的一些机电设备日常维护维修数据研究机电设备故障与其影响因素之间的关系。SASSO JOHN^[7]指出,如果忽略湿度因素,对燃气涡轮机故障预测的误差将超出正常值 3% 到 9% 之间。CARER PHILIPPE 和 BRIEND CHRISTALLAN^[8]研究了使用年限、温度、湿度、风速和雷电等多因素对中压设备线缆故障的影响。唐标^[9]通过对云南省变电站设备故障统计得出温湿度因素对云南地区电力设备故障影响占比 28.7% 的结论。赵欢^[10]指出,高湿环境会造成电气自动化设备的绝缘强度降低,使设备的泄露电流大大增加,甚至造成绝缘击穿,产生事故,同时高湿环境会造成霉菌生长,同样会引起设备绝缘性降低。另外高湿环境会造成金属锈蚀,引起电力设备故障。李金娥^[11]指出引起电气设备故障的因素中,气温占比 40%,环境湿度占比 28%。苏燕平^[12]指出环境湿度过高和过低都会引起集成电路故障。

在机电设备故障预测方法方面,现有的故障预测方法有很多种,主要有基于模型的故障预测方法、基于数据驱动的故障预测方法和基于概率统计的故障预测方法 3 类^[13]。基于模型的故障预测方法一般要求所应用的数学模型是已知的,包括物理模型方法^[14-15]、卡尔曼或扩展卡尔曼滤波或粒子滤波方法以及基于专家经验的方法等^[16-17];基于数据驱动的故障预测方法是指通过利用历史数据记录建立数学模型。这种预测方法不需要对象系统的先验知识(数学模型和专家经验),以采集的数据为基础,通过各种数据分析处理方法挖掘其中的隐含信息。分析方法主要有神经网络^[18-22]、灰色理论^[23]、隐马尔科夫模型等^[24];基于概

率的故障预测方法是从过去故障历史数据的统计特性角度进行故障预测,分析方法主要有回归分析预测法、时间序列预测法等^[25]。

通过对以上研究成果进行梳理和总结发现,首先,目前国内外学者在机电设备故障与其影响因素之间关系方面的研究主要针对环境因素(温度、湿度、风速、污染物和雷电等)对煤矿设备、电子设备以及电力设备的影响,与高速公路机电系统设备故障具有不同的影响因素;其次,在机电设备故障预测方面的研究尚缺乏针对多因素影响下的故障预测模型的研究。

本研究将从数据获取和模型建立可行性角度出发,在环境因素(平均温度、相对湿度和风速)之外,增加交通流量作为研究对象,并应用面板数据模型具有同时在时间和个体两个维度上对多个变量进行回归分析的特性,建立高速公路机电设备故障与其影响因素间的基于数据驱动的故障预测模型。

1 数据处理

为保证每一天机电设备故障数存在一定基数以建立平衡面板数据模型,本研究选取了中国北京市符合条件的 6 条高速公路机电设备故障数据作为样本数据。通过数据调查,获取中国北京市 6 条高速公路(6 条高速公路分别标记为 A、B、C、D、E、F) 2012 ~ 2013 年每天的机电设备故障、交通流量、平均温度、相对湿度和风速数据。本次共获取机电设备故障数 74 943 条。

交通流量:高速公路交通流量是指 2012 ~ 2013 年每一天内通过某条高速的交通实体数。

本研究利用 SPSS 对其 6 条高速公路机电设备故障数与交通流量进行双变量 Pearson 相关性分析,结果如表 1 所示。

表 1 机电设备故障数与车道流量的 Pearson 相关性分析结果

		故障数	交通流量
故障数	Pearson 相关性	1	0.864**
	显著性(双侧)	—	0.000
	N	5 117	5 116
交通流量	Pearson 相关性	0.864**	1
	显著性(双侧)	0.000	—
	N	5 116	5 116

注:**指在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 1 显示,高速公路机电设备故障数与车道交通流量之间的 Pearson 相关系数为 0.864,两变量的相关性在 0.01 的显著性水平上显著相关。因此,本研究增

加交通流量为新的研究对象,研究它与环境因素对机电设备故障的影响。

平均温度。平均温度是指 2012 ~ 2013 年每一天中的 2 时、8 时、14 时、20 时 4 个时刻气温的平均值。

相对湿度。相对湿度是指 2012 ~ 2013 年每一天中的 2 时、8 时、14 时、20 时 4 个时刻相对湿度的平均值。

风速。风速是指 2012 ~ 2013 年每一天中的 2 时、8 时、14 时、20 时 4 个时刻风速的平均值。

各条高速公路机电设备故障和交通流量统计情况分别如表 2、表 3 所示。

表 2 各条高速公路机电设备故障数(单位:次)

高速公路	2012 年故障数	2013 年故障数	故障汇总
A	11 870	11 488	23 358
B	7 109	4 901	12 010
C	3 620	3 083	6 703
D	5 046	5 149	10 195
E	1 931	2 097	4 028
F	4 749	4 201	8 950
汇总	39 816	35 127	74 943

表 3 各条高速公路交通流量数(单位:万辆)

高速公路	2012 年交通流量数	2013 年交通流量数	交通流量汇总
A	6 726.748 3	7 525.864 8	14 252.613 1
B	3 341.198 4	4 241.078 8	7 582.277 2
C	4 194.533 1	4 876.604 2	9 071.137 3
D	4 960.365 1	5 407.175 9	10 367.541
E	6 341.971 4	6 469.058 9	12 811.030 3
F	8 365.954 8	9 454.855 1	17 820.809 9
交通流量汇总	40 022.726 7	44 846.728 6	84 869.455 3

由表 2、表 3 可知,数据存在个体(不同高速公路)和时间两个维度,而面板数据模型具有同时融合时间和个体两个维度的数据,并对样本中每一个样本单位

表 4 各变量单位根检验

方法变量	机电设备故障		交通流量		平均温度		相对湿度		风速	
	Statistic	Prob. **	Statistic	Prob. **	Statistic	Prob. **	Statistic	Prob. **	Statistic	Prob. **
LLC	-22.378	0.000	-4.941	0.000	-0.022	0.491	-38.725	0.000	-63.835	0.000
IPS	-21.529	0.000	-7.133	0.000	-0.407	0.342	-30.352	0.000	-55.296	0.000
ADF-Fisher Chi-square	426.768	0.000	100.745	0.000	10.922	0.692	693.310	0.000	1 254.176	0.000
PP-Fisher Chi-square	1 280.489	0.000	562.848	0.000	14.995	0.379	704.642	0.000	1 265.999	0.000

其中,机电设备故障、交通流量、相对湿度和风速数据的 LLC、IPS、ADF-Fisher Chi-square、PP-Fisher Chi-square 检验结果概率均为 0,也就是说,以上变量数据

进行多重观察的特性。而且,这些特性使得面板数据模型在分析数据时能够提供更多的信息,克服时间序列分析受序列自相关等的困扰,更好地识别和度量单纯的时间序列和截面数据所不能发现的因素^[26]。因此,本研究选用面板数据建立高速公路机电设备故障与影响因素之间的预测模型。

2 模型设定

2.1 单位根检验

在模型建立之前,需要检验变量数据序列平稳性以及是否具有稳定的均衡关系,即对变量数据序列进行单位根检验和协整检验,以验证各变量数据是否适合使用面板数据模型建模。

单位根检验是检验数据序列平稳性的常用基本方法,也是构造模型的基础^[27],一般,面板数据的单位根检验多采用多种检验方法进行比较、分析和判断,以降低伪单位根检验的发生^[28],通过的检验越多,说明变量数据序列为平稳序列的可能性越大。若变量数据未通过单位根检验,说明变量数据是非平稳的,这时候,可以通过差分的方式将非平稳数据转化为平稳数据。

本研究选用的单位根检验方法为 LLC 检验^[29]、IPS 检验^[30]、ADF-Fisher Chi-square 检验^[31]、PP-Fisher Chi-square 检验^[32]。其中,ADF 检验和 PP 检验是实证分析中最为常用的单位根检验方法^[33]。各检验方法的显著性水平一般选取 0.05 或者 0.1,如果检验结果小于 0.05 或者 0.1,说明数据序列在 95% 或者 90% 的显著性水平上通过了单位根检验,显著性水平较高,可以使用面板数据建模。上述检验方法可以使用 EVIEWS 和 STATA 软件进行检验,这里不对检验过程进行介绍。

各变量数据的单位根检验结果如表 4 所示。

在 100% 的水平上通过了单位根检验。但是,平均温度数据的各项检验结果概率都大于 0.1,既平均温度数据通过单位根检验的显著性水平低于 90%,未通过

单位根检验,需要对数据进行一阶差分处理。一阶差分后,平均温度数据各项检验结果概率均为 0,通过了单位根检验。检验结果如表 5 所示。

表 5 平均温度一阶差分后(温度差)单位根检验		
Method	Statistic	Prob. **
LLC	-63.834 8	0.000
IPS	-55.296 3	0.000
ADF-Fisher Chi-square	1 254.176 4	0.000
PP-Fisher Chi-square	1 265.998 8	0.000

一阶差分后,物理意义变为每一天与前一天的平均温度差。本研究中把解释变量平均气温改为解释变量温度差。

从表 4 和表 5 可知,各变量数据通过了单位根检验,说明数据可以建立机电设备故障与交通流量、温度差、相对湿度和风速之间的面板数据模型。

2.2 模型设定

建立面板数据模型如下:

$$FA_{it} = \partial_i + \beta_1 TRE_{it} + \beta_2 TED_{it} + \beta_3 REH_{it} + \beta_4 WIS_{it} + \varepsilon_{it} \tag{1}$$

式中: i —高速公路,条; t —表示时间,天; FA_{it} —高速公路 i 在 t 日机电设备故障数值,次; TRE_{it} —高速公路 i 在 t 日的交通流量数值,万辆; TED_{it} —高速公路 i 在 t 日的温差数值,℃; REH_{it} —高速公路 i 在 t 日的相对湿度数值,%; WIS_{it} —高速公路 i 在 t 的风速数值,m/s; β_i —高速公路 i 的弹性系数; ∂_i —高速公路 i 的个体效应(混合回归模型为 ∂ ,个体固定效应模型、随机效应模型为 ∂_i); ε_{it} —干扰项。

本研究先后建立机电设备故障与交通流量、温差、相对湿度和风速之间的混合回归模型、个体固定效应模型和随机效应模型。然后采用 F 检验、豪斯曼检验,进行模型比较,选取最优模型。 F 检验具体情况如下:

建立假设:

表 6 Hausman 检验结果			
Test Summary	Chi-Sq. Statistic(χ^2 统计量)	Chi-Sq. D. f. (χ^2 统计量自由度)	Prob. (伴随概率)
Cross-section random(随机效应模型)	161.337	4	0

从表 6 可以看出,接受随机效应模型的概率为 0,即在 100% 的水平上拒绝原假设,故选取个体固定效应模型。

最后,本研究建立机电设备故障与交通流量、温差、相对湿度和风速之间个体固定效应模型。结果如表 7、表 8 所示。

$H0:\partial_i = \partial$ 。模型中不同个体的截距相同(真实模型为混合回归模型)。

$H1$:模型中不同个体的截距项 ∂_i 不同(真实模型为个体固定效应模型)。

F 统计量定义为:

$$F = \frac{\frac{SSE_r - SSE_U}{N - 1}}{\frac{SSE_U}{NT - N - K}} \sim F(N - 1, NT - N - K) \tag{2}$$

式中: SSE_r —约束模型,即混合回归模型的残差平方和; SSE_U —非约束模型,即个体固定效应模型的残差平方和; N —截面成员个数; T —样本观测期数; K —除常数项外的解释变量的个数。

若 F 统计量的值小于给定显著性水平下的相应临界值,即 $F = F_\alpha$,则接受假设 $H0$,认为样本数据符合模型混合回归模型。反之,若 $F \geq F_\alpha$,拒绝原假设 H_0 。

本研究截面成员是指 6 条高速公路, $N = 6$;本研究中样本观测期为 2012 ~ 2013 年的每一天, $T = 731$;解释变量为交通流量、温差、相对湿度和风速, $K = 4$ 。求解得到: $SSE_r = 1\,026\,309.094$, $SSE_U = 584\,886.045$,显著性水平取 $\alpha = 0.05$ 。

$$F = \frac{(SSE_r - SSE_U)/(N - 1)}{SSE_U/(NT - N - K)} = \frac{(1\,026\,309.094 - 584\,886.045)/(6 - 1)}{584\,886.045/[6 * 731 - 6 - 4]} = 660.528$$

计算 $F_{0.05}(5,437\,6)$,计算结果为 $F_{0.05}(5,437\,6) = 2.216$ 。

所以, F 统计量的值大于在 0.05 显著性水平下的相应临界值,即 $F > F_\alpha$,拒绝原假设 $H0$,样本数据符合个体固定效应模型。

然后,本研究对模型进行 Hausman 检验^[34],检验结果如表 6 所示。

表 7 个体固定效应模型				
Variable (变量)	Coefficient (系数)	Std. Error (标准误差)	t-Statistic (t-统计量)	Prob. (伴随概率)
TRE	-0.130	0.023	-5.610	0.000
TED	0.242	0.088	2.744	0.006
REH	0.022	0.009	2.641	0.008
WIS	1.117	0.217	5.149	0.000
C	27.057	1.076	25.137	0.000

表 8 模型统计量

统计量	数值
R-squared(R^2)	0. 875
Adjusted R-squared(调整 R^2)	0. 874
S. E. of regression(标准误差)	10. 704
Sum squared resid(残差平方和)	584 886. 045
Log likelihood(对数似然函数值)	- 19 381. 765
F-statistic(F 统计量)	3 561. 706
Prob(F-statistic)(F 统计量的伴随概率)	0
Mean dependent var(被解释变量的均值)	26. 752
S. D. dependent var(被解释变量的标准差)	30. 202
Durbin-Watson stat($D - W$ 统计量)	1. 306

从表 7、表 8 中可以看出,各解释变量弹性系数估计值的显著性水平都达到了 99% 以上,调整 R^2 值达到了 0. 874, F 统计量估计值显著性水平达到 100%,表明模型的拟合程度好,各参数变量的弹性系数估计值可靠性高。

拟合公式如下式所示:

$$FA = - 0. 130TRF + 0. 242TED + 0. 022REH + 1. 117WIS + 27. 057 \quad (3)$$

2.3 实验及结果分析

结合表 7 和公式(3),可以看出:①在高速公路机电设备故障的各种影响因素中,风速对高速公路机电设备故障影响最大,其次是温度差、交通流量和相对湿度;②风速、温度差和相对湿度对故障的影响为正效应,交通流量对机电设备故障的影响为负效应;③风速每增加 1 m/s,机电设备故障增加 1. 117 次;温度差每增加 1 $^{\circ}\text{C}$,机电设备故障增加 0. 24 次,相对湿度每增加 1%,机电设备故障增加 0. 02 次,交通流量每增加 1 万辆,机电设备故障降低 0. 13 次。

本研究中交通流量与高速公路机电设备故障呈现负效应,进一步分析中国北京市 2005 ~ 2014 年故障以及 2012 ~ 2013 年交通流量的日变化规律如图 1、图 2 所示。

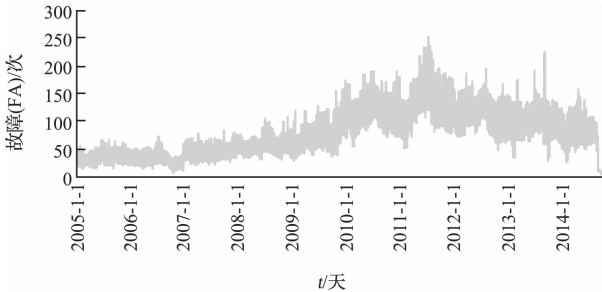


图 1 2005 ~ 2014 年中国北京市 6 条高速日故障变化趋势图

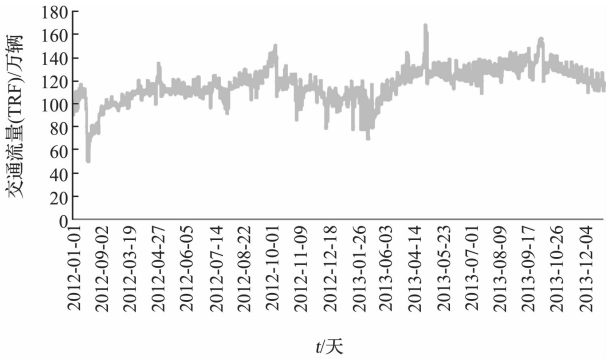


图 2 2012 ~ 2013 年中国北京市 6 条高速日交通流量变化趋势图

从图 1 和图 2 中看出,2012 ~ 2013 年,中国北京市 6 条高速公路机电设备故障数量呈现逐渐递减的趋势,而日交通流量则呈现出逐渐递增的趋势,做累计故障/累计交通流量图,如图 3 所示。

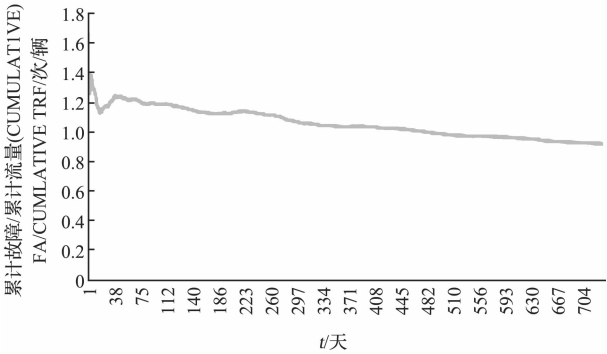


图 3 2012 ~ 2013 年中国北京市 6 条高速累计故障/累计交通流量图

从图 3 可以看出,2012 ~ 2013 年,中国北京市高速公路机电设备累计故障/累计交通流量呈现逐渐递减的趋势,交通流量与高速公路机电设备故障之间确为负效应。随着高速公路机电设备质量、维护维修水平都在逐年提高,机电系统的运行稳定性和承载能力也在逐渐增大,能够承担更多的交通量压力。

同理,本研究做累计故障/累计风速、累计故障/累计温度差图,如图 4、图 5 所示。

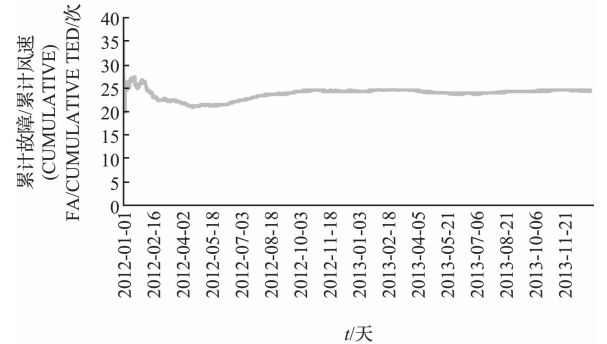


图 4 2012 ~ 2013 年中国北京市 6 条高速累计故障/累计风速图

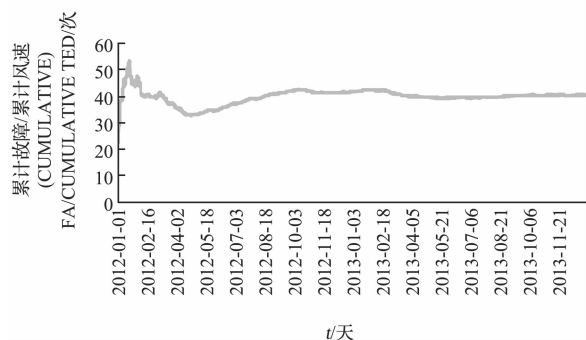


图5 2012~2013年中国北京市6条高速累计故障/累计温度差图

其中,因温度差存在负数,本研究对温度差取绝对值,然后做累计计算。

从图4、图5中可以看出,高速公路机电设备累计故障/累计风速、累计故障/累计温差呈现逐渐递增的趋势,风速与温度差与高速公路机电设备故障之间确为正效应。

3 结束语

高速公路机电系统作为维系高速公路正常运行最为重要的辅助系统,其设备的正常运行至关重要。通过以上的研究可以发现,面板数据模型可以较好地拟合高速公路机电设备故障与其影响因素之间的关系,而且在交通流量和环境因素中,风速是影响高速公路机电设备故障的最为重要的因素。不过,本研究没有对预测模型进行实例验证或对比,同时,引起高速公路机电设备故障的因素多种多样,需要建立更为全面的机电设备故障与其影响因素之间的多因素面板数据故障预测模型并继续完善和发展,提高模型的普适性是未来继续深化研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 付国龙. 高速公路机电设备多维分类研究及应用[D]. 西安:长安大学工程机械学院,2014.
- [2] 马鹏. 高速公路机电设备维护与管理经验探讨[R]. 成都:中国公路学会,2013.
- [3] 周旋,于艳波. 分析高速公路机电设备故障成因及预防控制措施[J]. 公路交通科技:应用技术版,2015(7):276-278.
- [4] 罗世兰,朱其义. 高速公路机电设备故障成因及预防控制措施[J]. 西部交通科技,2011(5):123-126.
- [5] 孙卫宏. 高速公路机电设备故障原因解析[J]. 交通世界,2010(2):120-122.
- [6] 张晓. 高速公路机电设备故障成因及解决办法[J]. 河南科技,2013(7):160.
- [7] SASSO JOHN. Errors resulting from excluding the effects of

humidity on the performance of combustion turbine plants equipped with evaporative coolers[C]. **ASME Power Conference**, Chicago: ASME, 2010.

- [8] CARER PHILIPPE. BRIEND CHRISTALLAN. Weather impact on components reliability: model for MV electrical networks[C]. International Conference on Probabilistic Methods applied to power systems, New York: IEEE, 2008.
- [9] 唐标,赵永辉,陈郑,等. 基于云南地区环境实验平台温湿度因子对电力设备影响的研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(24):239-242.
- [10] 赵欢. 温度湿度对电气自动化设备的影响[J]. 建筑工程技术与设计,2015(27):12-17.
- [11] 李金娥,王丽,薛斌. 温湿度对煤矿井下电气设备的影响[J]. 煤矿机械,2014,35(9):76-78.
- [12] 苏燕平,李向东,王政,等. 温湿度对大型医疗设备的影响及对策[J]. 医疗卫生装备,2008,29(10):210-219.
- [13] 荀小兵. 机电系统故障预测技术的现状及分析[J]. 中国科技纵横,2015(1):97.
- [14] VACHTSEVANOS G, LEWIS F, ROEMER M, et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems[M]. Caribbean: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [15] ADAMS D E. Nonlinear damage models for diagnosis and prognosis in structural dynamic systems[J]. **SPIE proceedings**, 2002, 4733(4):180-191.
- [16] CHELIDZE D. Multimode damage tracking and failure prognosis in eletromechanical system[J]. **SPIE proceedings**, 2002, 4733(4):1-12.
- [17] 薛子云,杨江天,朱衡君. 机械故障预测模型综述[J]. 机械强度,2006,28(S1):60-65.
- [18] FAN J Q, YAO Q W. Nonlinear time series: nonparametric and parametric methods[M]. Berlin: Springer, 2003.
- [19] ZHANG S, GANESAN R. Multivariable trend analysis using neural networks for intelligent diagnostics of rotating machinery[J]. **Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 1997, 119(2):378-384.
- [20] YAM RCM, TSE PW, LI L, et al. Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2001, 17(5):383-391.
- [21] WANG P, GACHTSEVANOS V. Fault prognostics using dynamic wavelet neuralnetworks[J]. **Ai-Edam-artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing**, 2001, 15(4):349-365.
- [22] 潘紫微,吴超英. 基于神经网络的多特征和多步轴承寿命预测方法[J]. 机械科学与技术,1999,18(4):584-586.
- [23] 杨江天,岳维亮. 灰色模型在机械故障预测中的应用[J]. 机械强度,2001,23(3):277-279.
- [24] WANG W Q, GOLNARAGHI M F, ISMAIL F. Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2004, 18(4):813-831.

- [25] JOSEPH E, KILLPATRICK. Laser gyro life prediction[P]. USA: US005719675A, 1998.
- [26] 胡 健, 张凡勇, 李 萍. 面板数据模型的应用现状与发展趋势[J]. 统计与决策, 2010(17): 21—24.
- [27] 陈海燕. 面板数据模型的检验方法研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2010.
- [28] 吕廷方, 杨 磊. 面板单位根检验的方法及稳定性的探讨[J]. 管理科学, 2010(21): 49-61.
- [29] LEVIN A, LIN C F, CHU C S. Unit root tests in panel data, asymptotic and finite-sample propertiss[J]. **Journal of Econometrics**, 2012, 108(1): 1-24.
- [30] IM K S, PESARAN M H, SHIN Y. Testing for unit roots in heterogeneous panels[J]. **Journal of Econometrics**, 2003(115): 53-74.
- [31] DICKEY D A, FULLER W A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root[J]. **Econometrica**, 1981, 49(4): 1057-1072.
- [32] BUCKLEY M J, EAGLESON G K, SILVERMAN B W. Testing for a unit root in time series regression[J]. **Biometrika**, 1988, 75(2): 355-346.
- [33] 靳良庭. ADF 检验和 PP 检验的可靠性比较[J]. 统计与决策, 2007(14): 8-10.
- [34] HAUSMAN J A. Specification tests in econometrics[J]. **Econometrica**, 1978, 46(6): 1251-1271.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

秦 余, 于 泉, 任广丽. 基于面板数据的高速公路机电设备故障多因素预测模型研究[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 596—602.

QIN Yu, YU Quan, REN Guang-li. Multi-factor prediction model of highway electromechanical equipment faults based on panel data model[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6): 596—602.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 585 页)

1	[A=90.00 R=1.00 W=750.00]
2	[A=90.00 R=4.00 W=200.00]
3	[A=90.00 R=1.00 W=200.00]
4	[A=90.00 R=1.00 W=800.00]
5	[A=90.00 R=2.00 W=800.00]
6	[A=90.00 R=3.00 W=250.00]
7	[A=90.00 R=2.00 W=750.00]

图 8 钣金折弯特征数据

图 8 中, 1~7 的序号和图 4 中的序号一一对应, A 表示折弯角度, R 表示折弯半径, W 表示折弯宽度。

由于特征数据保存在以折弯面为主结点的双向链表中, 可以快速获取钣金工件的特征数据, 该方法已经在笔者设计的钣金折弯编程与仿真系统中获得了成功的应用。

3 结束语

本研究在对钣金零件 IGES 文件分析的基础上, 采用以折弯面作为结点的双向链表结构建立钣金三维数据模型, 并根据 IGES 文件的数据特征, 提取钣金折弯特征, 在实际的应用中, 可以为后续的钣金折弯仿真以及折弯工序规划提供了可靠的折弯特征数据, 提高了钣金零件加工的质量与效率, 使得产品开发周期缩短近 30%。

由于钣金设计软件采用的 IGES 版本可能有所不

同, 接下来需要对不同的 CAD 系统导出的 IGES 文件进行分析, 对 IGES 文件读取方式进行相应的调整, 提高该方法的适应性。

参考文献 (References):

- [1] 符 莎, 郭 磊. 基于 SolidWorks 的复杂钣金折弯动画生成方法[J]. 机电产品开发与创新, 2010, 23(4): 123-124, 122.
- [2] 沈纪桂, 陈廉清. IGES-实现 CAD/CAM 系统间数据交换的规范[J]. 机电工程, 1998, 9(2): 5-7.
- [3] 王英姿. IGES 文件中裁剪曲面的剖析及正确显示方法[J]. 工程图学学报, 2005, 36(5): 156-160.
- [4] 侯志霞. 基于 STEP 的钣金零件特征识别系统[J]. 航空制造工程, 1998(6): 12-14.
- [5] 张春捷, 周雄辉, 李从心. 基于 NURBS 曲面曲率分析的钣金件自由特征识别技术[J]. 上海交通大学学报, 2010, 51(8): 1094-1099.
- [6] 陈伟栋, 陈立平. 钣金零件的特征建模研究与应用[J]. 机械与电子, 2000(2): 44-46.
- [7] 张 莹, 王兆辉. 面向钣金零件可制造性的特征识别[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36(2): 4-7, 21.
- [8] 吴燕兵, 许 超. 基于三维钣金模型的加工特征识别[J]. 成组技术与生产现代化, 2007, 24(3): 48-51.
- [9] MANGESH P, BHANDARKAR, RAKESH NAGI. STEP-based feature extraction from STEP geometry for agile manufacture[J]. **Computers in Industry**, 2000, 41(1): 3-24.
- [10] 刘志坚, 王义林, 李建军, 等. 钣金零件特征识别方法的研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(24): 52-55, 6.

[编辑: 周昱晨]