

基于瞬时转速信号的柴油机角域转换方法

范正天¹ 尚彦龙² 张泽丹¹ 茆志伟¹ 江志农^{1*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029;

2. 海军装备技术研究所, 北京 102442)

摘 要: 针对往复机械故障分析诊断中通过平均转速等间隔划分角度的方法诊断效果不精确的问题, 提出了一种利用瞬时转速对柴油机时域信号进行角域转换的方法。分析了转速波动较大工况下平均转速等角度划分方法中影响相位偏差产生的主要因素, 根据转速波动量的大小以及预期的角域精度范围设定阈值参数, 再通过该阈值实现角域转换方法的自动选择。研究结果表明, 在转速波动工况下采用瞬时转速对时域信号进行角域转换能够有效避免相位偏差, 为基于角域的柴油机故障诊断奠定基础。

关键词: 柴油机; 瞬时转速; 角域信号

中图分类号: TK421 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2017.06.011

引 言

柴油机采用不同气缸交替点火, 导致实际转速存在明显波动, 特别在升转速过程中转速波动特性强烈。而柴油机信号的采样方式大多是基于等时间的时域采样, 得到的信号为非平稳信号^[1], 此时需将得到的时域信号转换到角域进行信号分析。另外, 柴油机各零部件工作过程遵循时序性, 即特定的曲轴位置对应特定物理意义, 因此采用相位分析可使得柴油机信号的物理意义更加清晰。在众多信号分析方法中, 阶比分析是一种有效的柴油机信号分析方法, 而阶比分析的第一步就是将时域信号转换至角域^[2]。

将信号由时域转换到角域, 一般方法是基于键相信号, 通过将平均转速进行等间隔角度划分。该方法在转速波动剧烈的工况下极易造成相位偏差, 偏差较大时会导致基于角域分析的柴油机信号处理技术无法使用。如柴油机气门间隙增大会导致气门开启冲击相位延后、关闭相位提前, 但角度变化范围一般较小^[3], 若因角域转换方法带入偏差将影响故障分析诊断的准确性。

针对等间隔角度划分易造成相位偏差的问题国内外学者作了大量的研究。Maynard等^[4]认为等角度重采样就是把时域非平稳信号转变为相对于转速的平稳信号; 秦荣^[5]提出了一种基于等角度重采样的无转速测量信号阶次分析方法; 杨翠丽等^[6]将基于希尔伯特-黄变换等角度重采样的阶次分析方法应用于发动机凸轮轴故障诊断; 刘文彬等^[7]也利用角域重采样的方法进行振动信号的预处理; 孙宜权等^[8]利用等角度重采样的方法将信号从时域变换到角域进行柴油机喷油故障诊断研究。然而, 利用阶次分析法将时域信号重采样到角域, 其计算过程相比于利用平均转速更为繁琐和复杂; 而且重采样数据来自时域采样信号, 时域数据采样常常以经验设定采集频率, 致使阶次域分析带宽不够; 并且抗混滤波工作往往会被忽视, 没有遵循采样阶次量化准则, 造成阶次混迭^[9]。

基于此, 本文分析了相位偏差产生的主要因素; 提出了基于柴油机瞬时转速信号的角域转换方法; 比较了两种角域转换方法, 并给出两种方法的使用条件; 研究了在柴油机转速波动剧烈的工况下如何避免相位偏差, 得到准确的曲轴相位。

1 瞬时转速的测量

依据测量尺度的不同, 测得的柴油机转速分为平均转速和瞬时转速。其中, 平均转速通常指在数个工作循环内柴油机曲轴角速度的平均值, 用于描述稳定工况下柴油机的运行速度; 瞬时转速是指柴

收稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家“863”计划(2014AA041806); 中央高校基本科研业务费(ZY1617)

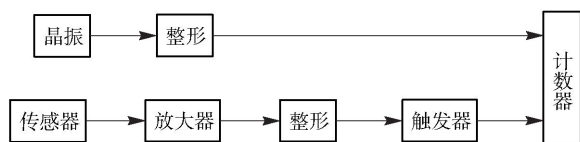
第一作者: 男, 1992年生, 硕士生

* 通讯联系人

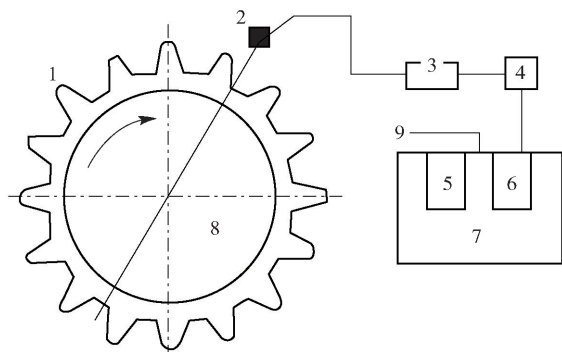
E-mail: jiangzhinong@263.net

油机在一个较小曲轴转角内的角速度平均值^[10],反映了柴油机转速瞬态波动情况,对曲轴角域转换具有重要意义。

瞬时转速的测量主要利用光电或磁电传感器测量与发动机同轴联接的齿盘或发动机启动飞轮齿圈的转角信号,通过计数器记录转角信号之间的时间间隔,用每一角度分辨率下的平均转速近似代替瞬时转速^[11]。其测量基本原理图、示意图^[12]及测量装置实物图分别如图1(a)、(b)、(c)所示。



(a) 原理图



1—飞轮起动齿圈;2—传感器;3—整形电路;4—异或调理电路;
5—A/D板;6—转速采集卡;7—计算机;8—飞轮;9—上止点信号。

(b) 示意图



(c) 装置实物图

图1 瞬时转速测量原理图、示意图及装置实物图

Fig.1 Schematic diagram of the instantaneous speed measurement, schematic diagram of the device and photograph of the device object

柴油机瞬时转速测量周期为

$$T = Nt_0 \quad (1)$$

其中, N 为计数器读数; t_0 为传感器采样时间间隔, 秒。此时被测转角 θ 内的平均转速(\bar{n})为

$$\bar{n} = \frac{60}{360} \frac{\theta}{T} = \frac{\theta}{6T} \quad (2)$$

因为 θ 通常在几度范围内, 与所分析的宏观角度相比数值较小, 所以可将 \bar{n} 近似看作瞬时转速

(n), 即

$$n \approx \bar{n} = \frac{\theta}{6T} \quad (3)$$

2 柴油机时域信号的角域转换

2.1 基于平均转速信号

柴油机曲轴相位的一般计算方法是基于键相信号和一个完整工作循环的平均转速对该工作循环进行等间隔角度划分。柴油机一个工作循环的间为

$$t = N / (60f_s) \quad (4)$$

其中, f_s 为柴油机采样频率, Hz; N 为一个工作循环的采样长度。

四冲程柴油机一个完整工作循环内曲轴旋转两周的平均转速为

$$n_r = 2/t \quad (5)$$

通过平均转速计算得到的曲轴转角为

$$\theta_r = 2\pi n_r / 60t \times 180/\pi = 6n_r t \quad (6)$$

2.2 基于瞬时转速信号

瞬时转速传感器通常正对柴油机飞轮齿圈, 并固定在飞轮外壳上, 它拾取的信号表示飞轮齿圈与传感器之间的位移。当飞轮转动时这个信号近似为正弦波, 每个正弦波对应飞轮上的一个轮齿^[10]。因此, 在各缸工作理想均匀状态下, 柴油机的瞬时转速均是发火频率为基频的周期性信号^[13]。

利用测得的瞬时转速 n_i 对一个工作循环时间 t 进行积分, 得到的曲轴转角为

$$\theta_i = 2\pi \int_0^t n_i dt / 60 \times (180/\pi) = 6 \int_0^t n_i dt \quad (7)$$

2.3 角域转换方法判断

为了尝试探索相位偏差的影响因素, 以最简单的理想工况为模型, 将理想状态下柴油机瞬时转速近似为正弦信号, 假设柴油机瞬时波动信号为

$$\omega = \omega_m + A \sin(Bt) \quad (8)$$

其中 ω_m 为小角度范围内的平均转速, r/min。

对转速进行积分求相位 θ_i :

$$\theta_i = 6 \int_0^t \omega dt = 6 \int_0^t [\omega_m + A \sin(Bt)] dt = \theta_m + \Delta\theta \quad (9)$$

$$|\Delta\theta| = \frac{A}{B} (1 - \cos Bt) \leq 2 \frac{A}{B} \quad (10)$$

其中, θ_m 为曲轴转角, $\Delta\theta$ 为相位偏差。

对于缸数为 x 的柴油机

$$B=2\pi f=2\pi\frac{\pi f_c}{2}=\pi\pi f_c$$

(11)

其中, f_c 为曲轴频率, Hz。

此时有

$$\Delta\theta_{\max}=2\frac{A}{\pi\pi f_c}$$

(12)

又有

$$A=\frac{360\Delta n}{60}=6\Delta n, f_c=\frac{n_m}{60}$$

(13)

其中, Δn 为柴油机转速的最大波动量, n_m 为平均转速, r/min。将式(13)代入到式(12)中,可以得到相位偏差

$$\Delta\theta_{\max}=\frac{2\times6\Delta n}{\pi\pi f_c}=\frac{2\times6\Delta n}{\pi\pi\frac{n_m}{60}}=\frac{720\Delta n}{\pi\pi n_m}\propto\frac{\Delta n}{n_m}$$

(14)

由此可见,对于一台柴油机而言,其缸数 x 是一定的,故在理想工况下,转速波动引起的相位偏差正比于转速最大波动值与平均转速之比。参数 $\Delta n/n_m$ 可以作为评价柴油机转速波动剧烈程度的一个判定参数。当 $\Delta n/n_m$ 值较大时,利用平均转速进行角域转换会出现曲轴相位不准确的问题。因此,对于任何一台柴油机,均可根据其转速波动量的大小以及预期的角域精度范围设定一阈值参数 α ,若 $\Delta n/n_m$ 大于 α ,则不可忽略瞬时转速波动对于相位信息的影响。角域转换方法的判断流程如图 2。

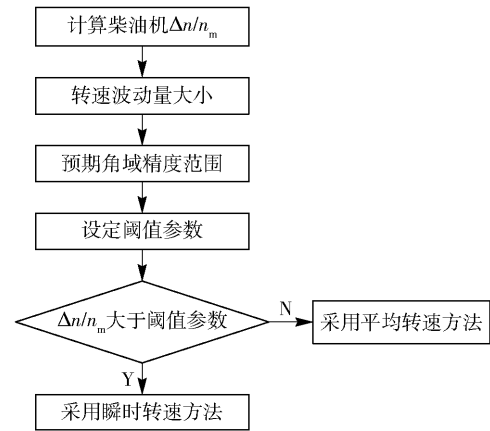


图 2 角域转换方法的判断流程图

Fig. 2 Flow chart for the angle domain conversion method

3 角域转换方法试验验证

3.1 基于瞬时转速信号的角域转换方法验证

在一些特定工程背景下,柴油机在启机时就需要准确判断其工作状态,而柴油机在启机时往往伴随着较大的转速波动。本文通过对柴油机启机工况

下某缸压力时域信号进行角域转换,得到分别基于平均转速和瞬时转速的曲轴转角与气缸压力的关系如图 3 所示。该缸理论点火相位为 360° 。

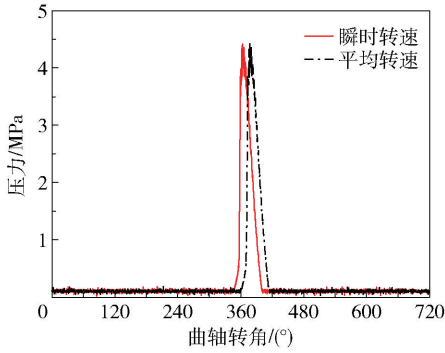


图 3 启机点火相位异常工况下曲轴转角与缸内压力关系

Fig. 3 Relationship between crank angle and cylinder pressure during the abnormal ignition phase of engine start-up

从图中可知,基于平均转速的气缸压力在 360° 开始升高,之后达到最大值,与实际情况不符;而基于瞬时转速的气缸压力在 350° 左右开始上升,在 360° 左右达到最大值,符合实际情况。由此可见,此时若采用平均转速进行角域转换则不能准确反映柴油机真实的工作状态,从而可能导致故障误判;而采用瞬时转速的角域转换能较为准确地反映柴油机工作状态。

3.2 角域转换方法试验对比

试验用柴油机主要性能参数见表 1。通过真实柴油机运行信号,对转速平稳工况和转速波动工况分别利用平均转速和瞬时转速进行角域转换,以验证第 2 章的分析结论。

表 1 试验用柴油机主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of test diesel engine

参数名称	参数值
柴油机功率/kW	2783
气缸数	12
发火顺序	A1 - B6 - A4 - B3 - A2 - B5 - A6 - B1 - A3 - B4 - A5 - B2
冲程数	4
缸径 × 行程/mm × mm	240 × 220
总排量/L	122
压缩比	9
活塞平均速度/m·s ⁻¹	10.4

当转速波动达到 110 r/min 时,分别利用平均转速和瞬时转速对柴油机一个工作循环运行信号的相

位信息进行计算,得到时间与曲轴转角的关系以及时间与相位偏差的关系如图 4 所示,得到曲轴转角和缸盖振动值的关系如图 5 所示。

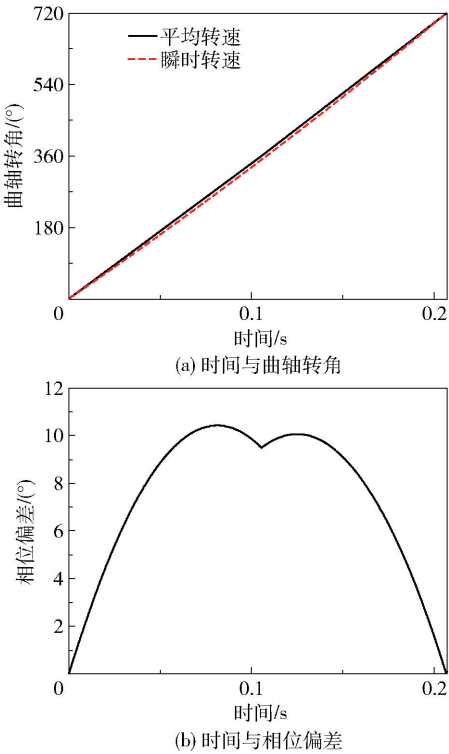


图 4 转速波动较大工况下时间与曲轴转角及时间与相位偏差关系
Fig. 4 The relationships between time and crank angle, and time and phase deviation under high speed fluctuation

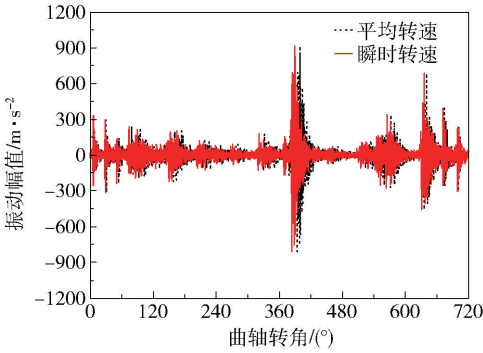


图 5 转速波动较大工况下曲轴转角和缸盖振动值关系
Fig. 5 Relationship between crankshaft angle and cylinder head vibration under high speed fluctuation

由图 4 可以看出,机组在升转速工况下由平均转速和瞬时转速两种方法分别求得的曲轴转角最大差值为 10.4°;由图 5 可以看出,出现曲轴转角最大差值时,采用瞬时转速求得曲轴转角为 267.3°,平均转速求得曲轴转角则为 277.7°,两者的差距表现

明显。因此,转速波动较大工况下,采用平均转速进行的角域转换会产生较大相位偏差,此偏差足以引起柴油机多种故障的误判。

当转速波动仅有 6 r/min 的较为平稳工况下,仍分别利用平均转速和瞬时转速对柴油机的一个完整工作循环信号进行相位信息计算,得到时间与曲轴转角的关系以及时间与相位偏差的关系如图 6 所示;得到曲轴转角和缸盖振动值的关系如图 7 所示。由图 6 可看出,机组在转速为 1500 r/min 左右平稳运行的情况下,平均转速和瞬时转速求得的曲轴相位差别不大,图 6(a)中两条曲线几乎重叠,曲轴转角最大仅相差 0.35°,此偏差对柴油机故障诊断造成的影响较小。图 7 中两者的振动信号相位也十分接近几乎无法区分。由此可见,对于平稳转速工况,基于平均转速和基于瞬时转速的相位计算结果相近。

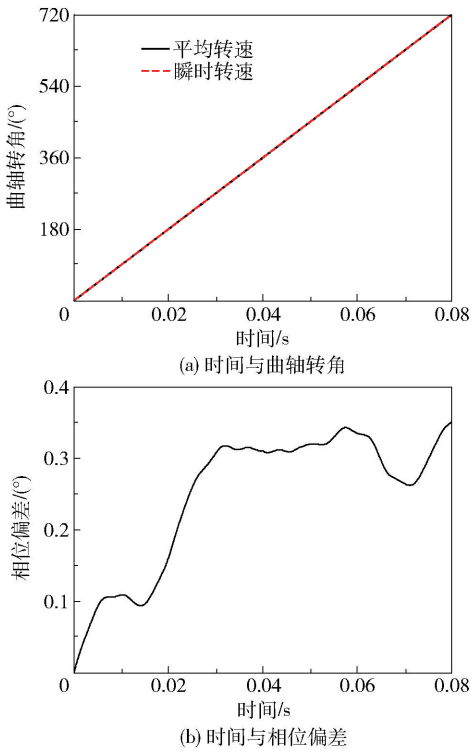


图 6 转速波动平稳工况下时间与曲轴转角及时间与相位偏差关系

Fig. 6 The relationships between time and crank angle, and time and phase deviation under steady speed fluctuation

关于如何判断机组的转速波动情况以及选用何种方法进行角域转换,本文对试验用柴油机组不同转速波动工况下的 $\Delta n/n_m$ 进行计算,得到其 $\Delta n/n_m$ 以及对应的相位偏差如表 2 所示;得到 $\Delta n/n_m$ 与相位偏差的关系曲线如图 8 所示。由表 2 和图 8 可

见,相位偏差随着 $\Delta n/n_m$ 的增大而增大,当 $\Delta n/n_m$ 为 0.376 时,有最大相位偏差 14.5791°。基于此,对于试验用柴油机组,推荐阈值参数 α 设为 0.1,此时相位偏差大约为 4°,是试验用柴油机的可接受相位偏差。

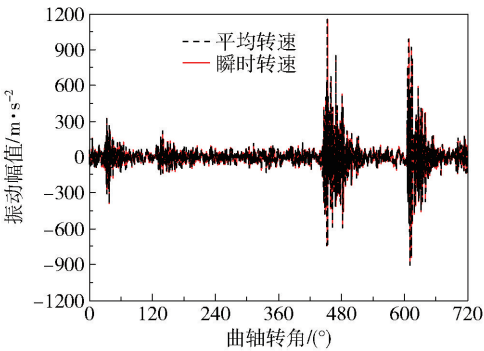


图 7 转速波动平稳工况下曲轴转角和缸盖振动值关系
Fig. 7 Relationship between crankshaft angle and cylinder head vibration under steady speed fluctuation

表 2 不同平均转速下的 $\Delta n/n_m$ 以及对应的相位偏差
Table 2 $\Delta n/n_m$ under different average speeds and the corresponding phase deviation

平均转速/ $r \cdot \min^{-1}$	$\Delta n/n_m$	相位偏差/(°)
324.5752	0.376	14.5791
445.2819	0.211	8.0286
579.1855	0.107	4.0272
679.4957	0.079	3.2011
799.5836	0.059	2.2238
886.0686	0.042	1.5947
986.8294	0.034	1.1221

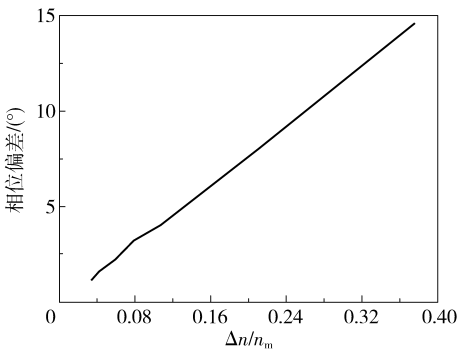


图 8 不同转速波动下 $\Delta n/n_m$ 与相位偏差的关系曲线
Fig. 8 The relationship between $\Delta n/n_m$ and phase deviation under different speed fluctuations

4 结论

(1)根据 $\Delta n/n_m$ 的大小可以判定柴油机组是否

需要利用瞬时转速进行角域转换。针对不同机组转速波动量大小及预期角域精度范围,可设定与 $\Delta n/n_m$ 正相关的参数 α ,当 $\Delta n/n_m$ 大于 α 时,需利用瞬时转速进行角域转换。

(2)对于试验柴油机组,在转速波动较为平稳的工况下,即 $\Delta n/n_m < 0.1$ 时,利用平均转速进行角域转换是可行的,此时引起的相位偏差较小可以忽略。

(3)在转速波动较大的工况下,即 $\Delta n/n_m > 0.1$ 时,利用平均转速进行角域转换存在 4° 的相位偏差,可能导致故障误判。此时利用瞬时转速进行角域转换较为精确,能够有效减小相位偏差。

参考文献:

[1] 傅俊庆,廖坤鹏,沈中伟. 旋转机械振动信号角域与时域采样方法的对比研究[J]. 长沙交通学院学报, 2007, 23(1): 74-80.
Fu J Q, Liao K P, Shen Z W. Comparison studies on sampling method of rotating machine vibration signals in time and angular domain[J]. Journal of Changsha Communications University, 2007, 23(1): 74-80. (in Chinese)
[2] 贾继德,孔凡让,王建平,等. 基于瞬时频率估计的柴油机信号阶比分析[J]. 内燃机工程, 2005, 26(3): 15-18.
Jia J D, Kong F R, Wang J P, et al. Order analysis of internal combustion engine signal based on instantaneous frequency estimation[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005, 26(3): 15-18. (in Chinese)
[3] 衣丰艳. 配气机构技术状态的检测及诊断参数的变化对发动机性能影响的试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2002.
Yi F Y. An experimental study on the influence of technology state detection of valve mechanism and changes of diagnosis parameters on performance of engine[D]. Nanning: Guangxi University, 2002. (in Chinese)
[4] Maynard K P, Lebold M, Groover C, et al. Application of double resampling to shaft torsional vibration measurement for the detection of blade natural frequencies[C] // Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach, USA, 2000.
[5] 秦荣. 基于振动分析的发动机故障诊断实用方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
Qin R. Research on practical method of fault diagnosis for engine using vibration signal [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011. (in Chinese)
[6] 杨翠丽,秦荣,杜灿宜. 基于EMD理论的等角度重采样方法在凸轮轴故障诊断中的应用[J]. 车用发动机,

- 2011(6): 81–84.
- Yang C L, Qin R, Du C Y. The application of constant angle re-sampling method in camshaft fault diagnosis based on EMD theory[J]. *Vehicle Engine*, 2011(6): 81–84. (in Chinese)
- [7] 刘文彬, 郭瑜, 李之雄. 基于 Wigner-Ville 分布的角域故障特征提取方法的研究[J]. *昆明理工大学学报: 理工版*, 2008, 33(1): 38–42.
- Liu W B, Guo Y, Li Z X. Research on method of angle domain fault feature extraction on Wigner-Ville distribution[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology*, 2008, 33(1): 38–42. (in Chinese)
- [8] 孙宜权, 王滨, 张英堂, 等. 基于自适应平行因子的柴油机喷油故障诊断研究[J]. *兵工学报*, 2013, 34(5): 519–526.
- Sun Y Q, Wang B, Zhang Y T, et al. Study of fault diagnosis of diesel engine fuel injection based on adaptive parallel factor[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 34(5): 519–526. (in Chinese)
- [9] 汪伟, 杨通强, 王红, 等. 非稳态信号计算阶次分析中的重采样率研究[J]. *振动、测试与诊断*, 2009, 29(3): 349–351.
- Wang W, Yang T Q, Wang H, et al. Research on resampling of order tracking analysis of non-stationary signals [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2009, 29(3): 349–351. (in Chinese)
- [10] 范志勇. 基于曲轴转速波动分析的内燃机故障诊断研究[D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2006.
- Fan Z Y. The fault diagnostic studies of internal combustion engine based on the analysis of crankshaft speed variation[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2006. (in Chinese)
- [11] 刘卫国, 陈家骅, 张立梅, 等. 内燃机瞬时转速的测量[J]. *内燃机学报*, 1999, 17(4): 388–390.
- Liu W G, Chen J H, Zhang L M, et al. The measurement of I. C. engine transient speed[J]. *Transactions of CSICE*, 1999, 17(4): 388–390. (in Chinese)
- [12] 俞水良, 秦培军, 王璐婷, 等. 瞬时转速的提取方法[J]. *小型内燃机与摩托车*, 2005, 34(4): 20–22.
- Yu S L, Qin P J, Wang L T, et al. The analysis method of engine instantaneous speed[J]. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2005, 34(4): 20–22. (in Chinese)
- [13] 胡玉平, 吴波. 内燃机瞬时转速的波动规律分析[J]. *山东工业大学学报*, 2001, 31(4): 306–312.
- Hu Y P, Wu B. Analysis of fluctuations of transient speed in internal combustion engines [J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2001, 31(4): 306–312. (in Chinese)

An angle-domain conversion method based on the instantaneous rotational speed signal of a diesel engine

FAN ZhengTian¹ SHANG YanLong² ZHANG YiDan¹ MAO ZhiWei¹ JIANG ZhiNong^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-Recovery for High-end Machinery,
College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;
2. Naval Institute of Technology and Equipment, Beijing 102442, China)

Abstract: In the fault diagnosis of reciprocating machinery, the traditional fault diagnosis method involving dividing the angle into equal intervals using the average rotational speed is inaccurate. A method of using the instantaneous rotational speed to transform the time-domain signal of a diesel engine into the angle-domain has been developed in this work. The main factors influencing the phase deviation in the method of the angular division of the average rotational speed under the condition of large rotational speed fluctuation are discussed, and the threshold parameter set according to the magnitude of the speed fluctuation rate and the expected angle-domain accuracy range. It is possible to automatically determine which method should be selected to perform the angle-domain conversion based on the threshold parameter. The results showed that phase deviation can be avoided by using the instantaneous rotation speed to transform the time-domain signal into the angle-domain under the conditions of speed fluctuation, which provides a basis for the fault diagnosis of diesel engines based on the angle-domain.

Key words: diesel engine; instantaneous rotational speed; angle-domain signal

(责任编辑: 汪 琴)