

旋转机械检测参数分析与实际测量方案研究

庞宇
(海力德工业(湛江)有限公司 广东 湛江 524000)

摘要: 本文针对旋转机械的状态预测和故障诊断开展研究,完成的工作主要包括对旋转机械的检测参数进行分析,对旋转机械的实际测量方案进行了梳理和分析,包括机体振动、平均扭矩、输出轴扭矩、平均转速、控制齿杆位置、瞬时转速和供油量等参数,并对上述参数的测量方案进行了确定。本文的研究对于旋转机械的参数测量和故障诊断具有重要的指导意义。

关键词: 旋转机械; 检测参数; 测量方案

1 检测参数分类

1.1 常用参数分类

表征旋转机械技术状态变化的常用参数主要分为三类。

1.1.1 性能参数

主要是旋转机械整体性能,包括输出性能、输入性能、效率性能等。

1.1.2 工作参数

主要指各机构和系统的工作参数,包括传动效率、压缩比、磨损情况、配合情况等。

1.1.3 响应参数

主要指机构运行当中的伴随参数,包括振动、噪声、温度等。

1.2 常用参数的检测方法

1.2.1 有效功率

有效功率是指旋转机械实际输出的功率,一般用标定工况下的功率表示,是反映旋转机械整体性能的重要指标。随着使用时间的增长,旋转机械各机构和系统零部件工作状态均会发生变化,导致整体功率下降

有效功率的测量一般通过台架试验,但实车评估其寿命一般采用无负荷加速测功的方法。台架试验测量精度高,主要用于旋转机械性能试验。无负荷加速测功是用旋转机械自身运动件的惯性代替负荷,在旋转机械急速情况下,迅速使旋转机械加速。在此过程中,旋转机械发出的指示功除克服内部机械阻力矩外,剩余的扭矩将全部用来带动输出部分加速运转。因此,根据旋转机械当量转动惯量和瞬时角加速度,即可计算旋转机械有效功率。实车曲轴瞬时角加速度通过曲轴瞬时转速计算。

1.2.2 扭矩

旋转机械在工作时,输出轴向传动装置传递扭矩,带动后续部件工作,因此扭矩是表征旋转机械技术状态的重要参数之一。

台架试验中,旋转机械输出扭矩可通过输出功率测量。实车测量扭矩,主要采用在输出轴贴应变片的方法,但在技术上存在一定难度。一是,输出轴暴露在外部的轴段部分短,且轴段较粗,应变有限;二是,部分旋转机械输出轴无外露,

采用传动端间接测量。

1.2.3 转速

转速是旋转机械最重要的性能参数之一,包括平均转速和瞬时转速。旋转机械在稳定运行时,平均转速基本不变,但其瞬时转速是不断变化的,其波动主要由于磨损、进气等引起的工作不均匀造成的。因此,瞬时转速包含丰富的旋转机械各缸工作状态信息,是评估旋转机械工作状态和寿命的重要参数。

旋转机械瞬时转速可通过在飞轮端布置光电式、磁电式传感器的方式测量,但在实际工作过程中测量瞬时转速,存在一定难度,主要是有的飞轮没有暴露,有的是无法加装传感器。

1.2.4 压缩压力

压缩压力是指旋转机械不供油状态下,用起动机拖动旋转机械旋转时压缩过程中产生的最高压力,是反映旋转机械工作状态的重要参数之一。随着使用时间增长、磨损加重、密封不严等影响,压缩压力会下降,严重时会造成旋转机械功率下降,无法继续使用。

气缸压缩压力测量通常采用直接测量和间接测量。直接测量旋转机械气缸压缩压力,通常采用加装压力传感器的方法进行,但受安装空间限制,只能测量一个缸的气缸压缩压力。间接测量旋转机械气缸压缩压力,可通过电机拖动旋转机械时起动电流测量。

1.2.5 机油中的磨损产物积累

机油中的磨损产物直接反映旋转机械各磨损件的磨损量,是旋转机械的重要工作参数之一。一般需拆解旋转机械后才能测量,实车上多采取对一定工作时间后的机油进行微粒物分析来测量。

1.2.6 输出温度

输出温度反映旋转机械的热负荷,是旋转机械的一个重要工作参数。相同工况下,随着使用时间的增长,输出温度会逐渐升高。输出温度一般通过在旋转机械输出端上安装传感器进行直接测量。

1.2.7 振动和噪声

旋转机械工作时,由于不平衡质量的存在,在运转中

会出现不平衡惯性力和力矩,这些交变的力和力矩将产生机械振动,同时由于振动等原因会产生噪声。振动和噪声在一定程度上反映了旋转机械运动件的磨损和缸内工作情况,是表征旋转机械技术状况的综合参数。

2 检测参数确定

通过上述分析,可以看出旋转机械常用检测参数中,有的直接表征旋转机械整体技术状态;有的间接表征旋转机械整体技术状态;有的直接表征旋转机械使用时间和寿命;有的便于实车不解体测量,有的实车不解体测量存在一定难度。

随着旋转机械使用时间增长,上述各参数均会反映旋转机械整体技术状态的变化。因此,评估旋转机械整体性能和剩余寿命,必须综合考虑各参数的变化,基于多参数方法,才可能达到满意的效果。结合本文研究对象结构特点,确定旋转机械技术状态检测参数的原则如下。

2.1 敏感性

检测参数应当对旋转机械整体性能和使用时间的变化有极高的敏感性。

2.2 有效性

检测参数能够有效提取旋转机械技术状态变化特征。

2.3 易测性

检测参数在实车上能够实现不解体测量,且不破坏旋转机械结构。

2.4 稳定性

检测参数在同一工况下应保持相对稳定。

3 实际测量方案

3.1 确定检测参数

本文研究对象为某型旋转机械,一般用于动力传动装置为 B8V160RZASL 发动机和 HSRT400 综合变速装置,其结构复杂,在动力舱中布置紧凑,旋转机械输出轴和飞轮无外露。因此,旋转机械的曲轴扭矩、瞬时转速、压缩压力、控制齿杆位置等参数无法进行实车直接检测。

综合检测参数的敏感性和有效性,确定评估旋转机械整体性能和剩余寿命的检测参数为:机体振动;平均扭矩;输出轴扭矩;平均转速;控制齿杆位置;瞬时转速;供油量。

3.2 参数实车检测

为研究旋转机械技术状况在全寿命周期内的变化规律,选择对使用时间在 0~3800 摩托小时内的某型旋转机械进行实车试验。由于使用时间跨度较大,在有限时间内无法实现对各阶段进行全寿命周期跟踪试验,因此本文按 500 摩托小时的间隔将旋转机械使用时间分为 8 组,每组选择 2 个机械作为试验样本进行实车检测。

3.2.1 实车检测方案

实车检测时,由于各参数需要的测量工况不完全相同,因此分旋转机械起动过程检测、原位空档检测、行进间检测 3 种情况进行,方案如下:

3.2.1.1 起动过程检测

起动过程检测条件是按下起动按钮,不为旋转机械供

油,使起动电机拖动旋转机械运转。数据采集从旋转机械起动前 1~2 秒开始,至旋转机械稳定运转 2~3 秒停止。

3.2.1.2 原位空档检测

原位空档检测条件为旋转机械原地空转,位置于空档。检测过程按转速分为稳定工况和加减速工况进行,稳定工况下分别采集旋转机械转速在 800r/min、1200 r/min、1600 r/min、2000 r/min 稳定工作时的原始信号,加减速工况下采集旋转机械转速以最快速度从怠速加速到 2200r/min 及从 2200r/min 减速到 0 过程中的原始信号。

3.2.1.3 行进间检测

行进间检测条件为车辆在水平路上行驶,分别按 1、2、3、4、5 档顺序,采集旋转机械转速在 800r/min、1000r/min、1200r/min……2200r/min 时车辆匀速直线行驶的原始信号。

3.2.2 实车参数测量

上述检测方案中各参数的测量方法及测量结果如下。

3.2.2.1 振动信号

振动信号采用压电式加速度传感器,传感器灵敏度为 100mV/g。根据实车安装条件,测点布置在旋转机械输出端飞轮壳外侧。

相关研究表明,旋转机械缸盖振动信号的能量分布,主要集中在 5kHz 以上的高频区域,根据那奎斯特采样定理,为留有余量,本文选取采样频率 $f_s = 20\text{kHz}$,实车检测原位空档 800r/min 的振动信号,经初步时频分析,振动信号稳定无频率混叠,能满足特征提取要求。

3.2.2.2 平均转速

通常情况下,检测曲轴转速需要在飞轮齿盘加装霍尔传感器。但本文研究的某型旋转机械,由于车辆的动力传动系统结构紧凑,无法通过加装传感器的方式直接测量曲轴转速,因此通过串口通信的方式,读取电控计算机内的平均转速信号。

该车型的串口通信采用一收一发的问答式通信方式。本文设计的读取程序流程如下:

(1) 读取程序向车载计算机发送连接请求,若收到计算机返回的连接标识,表示握手成功;

(2) 读取程序向车载计算机请求数据,每发送一次数据请求,计算机返回一个字节的的数据回复,如此反复;

(3) 当计算机按协议将本次通信的数据发送完全后,若程序再次请求数据,计算机将返回结束标识,告知本次通信结束;

(4) 通信结束后,若要再次读取车载计算机数据,则需重新向车载计算机发送连接请求。

一般车辆实际的平均转速在报文的第 3、4 个字节,通过串口通信,除了能检测旋转机械转速之外,还能够检测到喷油泵控制齿杆位置和旋转机械水温、油压、排气温度等运行状态参数。

由于车载计算机串口通信的波特率较低,且问答式通信每次通信时长略有偏差,读取程序采用 1Hz 的频率,定时发送请求,实现车载数据的等间隔采样。

3.2.2.3 控制齿杆位置

与曲轴平均转速相同, 旋转机械控制齿杆位置也无法通过在喷油泵加装位移传感器直接测量。因此也需要通过串口通信, 读取电控计算机内的控制齿杆位置信号。根据通信协议, 可以看出, 喷油泵控制齿杆位置参数位于报文第 7、8 字节处, 故该参数可以同曲轴平均转速同步采集。实车同步测得旋转机械加减速过程的平均转速和控制齿杆位置信号, 通过串口通信读取的原始信号能准确反映旋转机械平均转速和控制齿杆位置。

3.2.2.4 传动装置输出轴扭矩

本文研究的旋转机械输出轴和飞轮没有外露, 不具备实车检测旋转机械曲轴扭矩的条件。因此, 本文通过检测传动端输出轴扭矩, 结合综合传动效率模型, 推导计算旋转机械输出扭矩和功率。

扭矩测量采用全桥式应变片测量方法, 测量电路如图 1 所示, 贴片方式如图 2 所示。电阻应变片的初始电阻为 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 当弹性轴受到力矩 M 作用时, 四个电阻应变片 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 分别产生相应正负应变, 且有 $|dR_1| = |dR_2| = |dR_3| = |dR_4| = |dR|$ 。此时全桥电路的输出电压为:

$$V_o = \frac{dR}{R} V_i = \frac{16(1+2\mu)M}{E_g \pi D^3} V_i$$

式中: V_i 为测量电路电源电压, V_o 为测量电路输出电压, M 为测量轴受到扭矩, μ 为材料泊松比, E_g 为材料弹性模量, D 为测量轴直径。

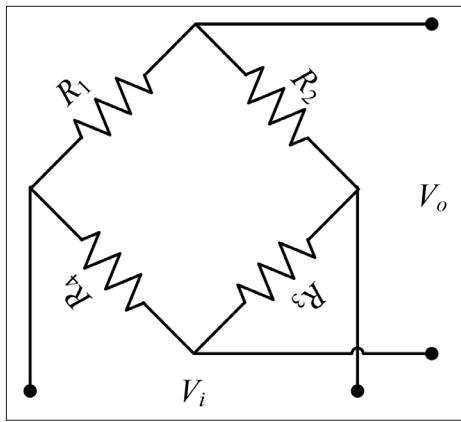


图 1 应变片全桥电路

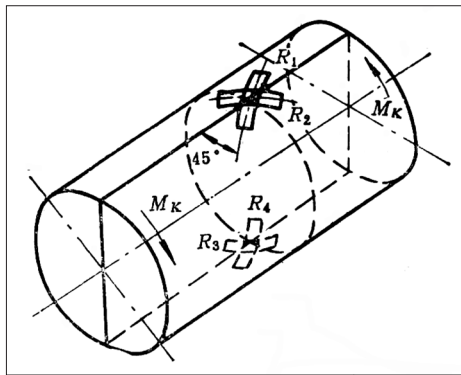


图 2 应变片贴片方式

本文采用 WSMC1-X 无线应变测试模块对传动装置输出轴扭矩进行测量, 该模块提供的电源电压为 2.5V, 测量范围 0~2500mV, 测量精度 0.1mV, 最大采样频率 1kHz, 并且可以通过预设测量轴参数直接输出扭矩信号。由于测试需要模块随轴转动, 本文设计了实车专用安装卡具。

被测轴参数, 采样频率选取 $f_s = 1\text{kHz}$ 。

800r/min 稳定工况匀速直线行驶时, 测得传动装置输出轴扭矩可以看出实车测得扭矩信号稳定, 并能反映传动端扭矩的交变波动。

3.2.2.5 瞬时转速

根据前文分析, 该旋转机械曲轴瞬时转速无法通过加装传感器的方式直接测量, 而仅凭曲轴平均转速又无法保证旋转机械加减速特征提取的精度。本文通过对振动信号特征频率的分析, 提出了一种基于振动信号的瞬时转速计算方法, 通过对旋转机械输出端振动信号的处理, 计算了急加减速过程中旋转机械曲轴瞬时转速。

3.2.2.6 供油量

通常情况下, 旋转机械循环供油量的检测是通过在旋转机械的供油链路中加装燃油流量传感器, 进行测量并计算。本文通过喷油泵台架试验, 测量了喷油泵在不同控制齿杆位置时的速度特性, 通过研究其喷油量随转速和齿杆位置的变化规律, 建立了旋转机械转速和控制齿杆位置对喷油量的映射关系, 依据实车测量的平均转速和控制齿杆位置, 实现了不同工况下对旋转机械循环供油量的计算。

3.2.2.7 扭矩

曲轴扭矩是直接反映做功情况的重要参数, 由于该车型不具备实车直接测量条件, 通过建立旋转机械工作过程模型和传动装置效率模型, 提出了一种旋转机械曲轴扭矩的计算方法, 依据实车检测的传动装置输出轴扭矩, 实现了不同工况下对曲轴扭矩的计算。

4 结语

本文在分析旋转机械技术状态常用检测及其检测方法的基础上, 确定了评估旋转机械性能和剩余寿命的检测参数, 结合研究对象结构特点和研究目的, 制定了各参数实车检测方案, 完成了对不同使用时间的参数检测试验。主要工作总结如下:

(1) 分析了旋转机械常用检测参数体系, 研究了检测参数随旋转机械工作状态变化的趋势和规律, 研究分析了常用参数的检测方法。

(2) 结合研究对象和研究目的, 提出了检测参数的选取原则, 确定了实车检测参数。

(3) 制定了检测参数的实车检测方案, 研究了各检测参数的实车检测方法, 并对不同使用时间的旋转机械进行了实车检测。

(4) 实车检测结果表明, 测得各参数原始信号, 能够满足特征提取要求。

参考文献:

- [1] 张志成. 面向无标签数据的旋转机械故障诊断方法研究 [D/OL]. 长春: 吉林大学, 2021[2021-09-08]. <https://d.wanfangdata.com.cn/thesis/D02340938>.
- [2] 王有德. 针对 CT 系统参数标定和成像建模及算法研究 [J]. 辽宁工业大学学报 (自然科学版), 2021, 41(02): 84-89.
- [3] 陈亚楠, 胡凯凯, 陈刚, 胡婵娟, 舒晖, 李籽圆. 基于机器学习的旋转机械故障诊断研究 [J]. 风能, 2020(12): 74-78.