

摇架弹簧的研制及可靠性分析

机械科学研究院□王德成 姜膺

山西经纬合力公司协理机械厂□王玉山

无锡钢能弹簧研究所□周平钢

北京科技大学□张英会

摘要 本课题以纺织机械用摇架弹簧的开发研究为基础。对摇架弹簧的材料、工艺、试验、检测、数据分析处理和管理进行了全方位的研究。以期使我国的摇架使用寿命向国际水平迈进。摇架弹簧的失效模式主要是松弛。为此,采用抗松弛性能良好的 55CrSi 等三种材料,严格控制加工工艺的各个环节,对制成的弹簧进行模拟试验,采集数据进行统计和分析。本文着重介绍课题研究中的数据采集、分析和处理方法及模式。

关键词 摇架弹簧 可靠性 概率统计

1 前言

受山西经纬合力公司四厂的委托,本课题组承担了摇架弹簧的开发研制工作。本课题包括弹簧材料、制造、工艺、试验、检测、数据分析处理和管理全方位的研究,以期使我国的摇架水平向国际水平迈进。为此弹簧材料采用抗松弛性能良好的 55CrSi 等 3 种钢丝,在比较其性能的基础上,择优而用。制造工艺除了采用数控机床成型外,严格控制工艺流程的各个环节,并采用先进的强压处理,加强其稳定性。

松弛试验是在德国 DV-8 疲劳试验机上进行的,数据的采集使用自动数字显示测试机完成的。这样完全保证了实验数据的有效性和真实性。根据概率统计分析对数据进行了评估分析,使所得数据结果具有必要的相关性和可靠性。

本课题的研究无论在技术上和规模上都是空前的,所得的结果无疑是具有先进性和可靠性。

本课题组由机械科学研究院主持,参加单位有中国机械工程学会弹簧失效分析委员会、北京科技大学等同仁。

2 数据的采集

数据采集的方法为抽样、检测、试验、测量和整理。

1) 抽样:为了得到可靠性高的评估结果,对试验的 55CrSi 等 3 种材料各随机抽取 200 个样本。

2) 检测:对抽取的弹簧样本检测其合格性,并采集原始数据。

3) 试验:为了评估弹簧的松弛性,在疲劳机上模拟摇架的工作情况进行微幅振荡试验。

4) 测量:试验过程中,在振动分别进行到 100、500、 10^3 、 5×10^3 、 10^4 、 5×10^4 、 10^5 、 5×10^5 、 10^6 、 5×10^6 、 10^7 时停机,测试弹簧的变化,并记录其数据。

以下数据的评估,仅以 55CrSi 材料为例,其他两种材料处理方法相同,不再阐述。

3 数据的评估思路

应用概率统计理论对数据进行处理。

1) 为了充分发挥数据的效能和可靠性,纵向的数据(即同一振荡次数)200 个,以各种分布为基础寻找分布的参数,根据所得相关性,确定采用分布的类型及参数(见表

1), 从而得到在某一振荡下 200 个代表数据, 每种材料共 12 个。

2) 根据从项处理所得各种材料的 12 个代表数据进行横向的处理。横向处理采用回归方法拟合预测曲线 $F=f(n)$ 。根据此方程便可得到各个振荡次数下弹簧的作用负荷。

4 分布的检测与参数估计

为了能更好的反应试验结果, 要根据试验所得数据来推断其服从哪种类型分布, 根据分布类型综合估计参数, 作为分析和评估寿命的依据。

作为松弛和疲劳试验数据其常服从的分布类型大致有威布尔分布、正态分布、对数分布。以概率图估法进行分布单数估计与假设检验, 即以最小二乘法进行参数估计。以概率图形中点的分布趋势和计算出的相关系数 r 是否大于 r_c (给定置信度下的临界值) 来定性、定量检测是否服从该分布。以附表 1 的数据为例, 按 3 种分布处理后的数据列于表。

从处理后的结果看, 虽然三种分布处理方法均能通过, 但正态分布处理较为直观。因此所有材料均已正态分布处理为宜。处理结果分别列于表 1 中。

表 1 55CrSi 材料 200 个试样在 10^7 次振荡后负荷分

布类型参数的估计和其相关性

参数及相关值	正态分布	对数正态分布	威布尔分布
均值负荷 $F(50)$ (失效率为 50%) N	$F(50)=\mu$ 245.5233	$F(50)=\mu$ 245.5155	246.3694
标准值 σ	2.000369	2.005851	1.948094
负荷 $F(0.1)$ (失效率为 0.1%) N	239.3257	239.4006	236.0221
相关系数 r	0.9978288	0.9960002	0.9463492
相关系数临界值 r_c	0.9552342	0.9552342	0.9902919
相关性验证	$r > r_c$ (通过)	$r > r_c$ (通过)	$r > r_c$ (通过)

5 弹簧样本数据的统计值

按正态分布对各种材料的数据的统计值列于表 2。表列实效率为 50% 和失效率 0.1% 时的负荷 $F(50)$ 和 $F(0.1)$ 。所谓失效率 50% 既为均值负荷, 有 50% 试样能达到的水平。 $F(0.1)$ 为试样有 99.9% 能达到的水平。由于 $F(0.1)$ 有 99.9% 置信水平, 更有实际意义, 能代表弹簧的松弛水平。从列表作用次数在 10^7 时的 $F(0.1)$ 来看均在允许值范围内。同时从列表相关系数 r 来看, 相关性较高, 均能达到临界值。

表 2 55CrSi 弹簧的均值负荷 $F(50)$ 和 $F(0.1)$ 的统计值

序号	作用次数	失效负荷 $F(50)$ (失效率 50%) N	负荷 $F(0.1)$ (失效率 0.1%) N	标准差	相关系数 r	验证结果
C01	0	246.8418	240.6134	2.010322	0.9954109	通过
C02	10^2	246.8279	240.6857	1.982487	0.9958735	通过
C03	5×10^2	247.9070	240.4071	2.097938	0.9953367	通过
C04	10^3	246.6263	240.1754	2.081147	0.9954271	通过
C05	5×10^3	246.6512	240.6844	1.925867	0.995448	通过
C06	10^4	247.4395	240.9845	2.083452	0.9954280	通过
C07	5×10^4	247.3535	240.7213	2.140649	0.9957430	通过
C08	10^5	247.2720	240.9140	2.052155	0.9971835	通过
C09	5×10^5	247.7465	241.2329	2.102364	0.9953124	通过
C10	10^6	247.8907	241.9079	1.931038	0.9960801	通过
C11	5×10^6	245.8837	239.4349	2.081450	0.9961508	通过
C12	10^7	245.5233	239.3257	2.000369	0.9978288	通过

其余相关系数临界值 $r_c=0.9952342$ 。

各种材料弹簧负荷的预测方程根据表 3

建立的弹簧负荷的预测方程列于表 4 和表 5。

表 3 曲线函数转化为回归式

序号	原函数关系	变量代换过程
1	$F_0 = a + bn_0$	$n = n_0, F = F_0$
2	$\frac{1}{F_0} = a + \frac{b}{n_0}$	$n = \frac{1}{n_0}, F = \frac{1}{F_0}$
3	$F_0 = dn_0^b$	$n = \ln n_0, F = \ln F$
4	$F_0 = de^{-bn_0}$	$n = n_0, F = \ln F$
5	$F_0 = de^{\frac{b}{n_0}}$	$n = \frac{1}{n_0}, F = \ln F_0$
6	$F_0 = a + b \ln n_0$	$n = \ln n_0, F = F_0$
7	$F = \frac{1}{a + be^{-n_0}}$	$n = e^{-n_0}, F = \frac{1}{F_0}$

6 弹簧负荷的预测与分析

(1) 数学模型的选择与建立

为对负荷进行预报与分析比较,需回归负荷 F 与作用次数 n 的预报方程。在此运用最小乘法的原理求得回归方程 $F=a+b \cdot n$ 然而实际的 $F-n$ 关系并非一定是线性关系,为此,可对式中的 F 和 n 进行变量代换,即可将如下曲线函数转化成上式的标准回归式,进行计算。

(2) 相关性检验

为检验回归方程的相关程度,本文从下列三个变量予以衡量:

剩余平方和

$$Q = \sum (F_i - F)^2$$

剩余标准差

$$S = \pm \sqrt{\frac{Q}{x-2}}$$

相关系数

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (F_i - F)^2}{\sum (F_i - \bar{F})^2}$$

回归结果 Q 、 S 越小,同时 r^2 越接近 1,说明拟合程度越好。最终以 r^2 是否大于给定置信度 $\alpha=0.01$ 水平下,相关系数的临界值 $r_{0.01}$ 来判定 F 与 n 之间的预报方程是否成立。

(3) 弹簧的预报方程

为找出最佳预测的方程,准确表达 F 与作用次数 n 之间的变化关系,对每种材料的失效率为 50% 的均负荷 $F(50)$ 和失效率为 0.1% 的 $F(0.1)$ 按照上述 7 种函数关系进行了回归、检验与综合比较。对于 55CrSi 材料 $F(50)$ 和 $F(0.1)$ 详细回归结果如表 4 和表 5 所示。

同样对其他材料的负荷 F 与作用次数 n 之间按照上述 7 种函数关系进行了回归、检验。结果发现这三种材料都是第 3、6 种函数具有较高的相关性,也就是以这些函数来表达松弛后的负荷量较为合适。按照相关系数看,除 55CrSi 材料弹簧的均值负荷 $F(50)$ 采用第 3 种函数外,其余弹簧均采用第 6 种函数作为预测方程。

应用预测方程,便可对各作用次数下的弹簧负荷作出估计。如作用次数为 10^7 和 1.11×10^{10} 时的负荷 $F(0.1)$ 按表 4 和 5 为:

$$\begin{aligned} 10^7: F(50) &= 248.280884 \times n^{(-0.000663)} \\ &= 248.280884 \times 10^{7 \times (-0.000663)} \\ &= 245.6418 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(0.1) &= 242.442734 - 0.137094 \ln(n) \\ &= 242.442734 - 0.137094 \ln(10^7) \\ &= 240.233 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1.11 \times 10^{10}: \\ F(50) &= 248.280884 \times n^{(-0.000663)} \\ &= 248.280884 \times 1.11 \times 10^{10 \times (-0.000663)} \\ &= 244.129 \text{ N} \end{aligned}$$

$$F(0.1) = 242.442734 - 0.137094 \ln(n)$$

$$=242.442734-0.137094\ln(1.11\times 10^{10})=238.9560\text{ N}$$

表4 失效率50%的均值负荷 $F(0.5)$ 7种函数关系回归结果

函数种类		回归系数	方差分析		
1	$F_0 = a + bn$	$a=246.812042$ $b=-0.0000$	$Q=8.228$	$S=0.9071$	$r^2=0.1127$
2	$\frac{1}{F} = a + \frac{b}{n}$	$a=0.004057$ $b=-0.000035$	$Q=4.9787$	$S=0.7056$	$r^2=0.4631$
3	$F = d \cdot n^b$	$d=248.280884$ $b=0.000663$	$Q=2.1579$	$S=0.4645$	$r^2=0.7673$
4	$F_0 = de^{-bn}$	$d=246.81059$ $b=0.000663$	$Q=8.2273$	$S=0.9070$	$r^2=0.1128$
5	$F = d \cdot e^{\frac{b}{n}}$	$d=246.4971$ $b=0.008657$	$Q=4.9787$	$S=0.7056$	$r^2=0.4631$
6	$F = a + b \cdot \ln n$	$a=248.3059$ $b=-0.0167927$	$Q=2.1614$	$S=0.4649$	$r^2=0.7669$
7	$F = \frac{1}{a + b \cdot e^{-n}}$	$a=0.004057$ $b=-0.000095$	$Q=5.0024$	$S=0.7072$	$r^2=0.4606$

注: Q 为剩余平方和; S 为剩余标准差; r^2 为相关系数。

表5 失效率0.1%负荷 $F(0.1)$ 的7种函数关系回归结果

函数种类		回归系数	方差分析		
1	$F = a + b \cdot n$	$a=241.202454$ $b=-0.000000$	$Q=8.2328$	$S=0.907348$	$r^2=0.1169$
2	$\frac{1}{F} = a + \frac{b}{n}$	$a=0.004151$ $b=-0.000023$	$Q=7.7483$	$S=0.882292$	$r^2=0.1650$
3	$F = d \cdot n^b$	$d=242.575150$ $b=-0.000652$	$Q=3.3384$	$S=0.57779$	$r^2=0.6619$
4	$F_0 = de^{-bn}$	$d=241.200638$ $b=0.000000$	$Q=8.2273$	$S=0.9072$	$r^2=0.1170$
5	$F = d \cdot e^{\frac{b}{n}}$	$d=240.933136$ $b=0.005640$	$Q=7.7842$	$S=0.8822$	$r^2=0.1650$
6	$F = a + b \cdot \ln n$	$a=242.442734$ $b=-0.0137094$	$Q=3.3357$	$S=0.575$	$r^2=0.661$
7	$F = \frac{1}{a + b \cdot e^{-n}}$	$a=0.004351$ $b=-0.000063$	$Q=7.8036$	$S=0.883$	$r^2=-0.0005$

7 预测估计值与试验值的比较
根据表4和表5所列弹簧的预测方程,

可以得到各作用次数下的负荷估计值,如表6所列。经与试验值对照比较,误差尚能接

受。因而所推测到作用次数在 1.11×10^{10} 时的
弹簧估计值具有可信性。

值均在允许松弛的范围内, 满足 20 年使用要
求。

各种材料在 1.11×10^{10} 作用次数的估计

表 6 55CrSi 材料弹簧力试验值与估计值的比较

序号	作用次数 n	均值负荷 (50) (失效率 50%) N			负荷 (F10.1) (失效率 0.1%) N		
		试验值 N	估计值 N	误差	试验值 N	估计值 N	误差
G01	0	248.635	248.281	0.354 (0.1%)	242.289	242.443	-0.154 (0.1%)
G02	10^2	246.810	247.524	-0.714 (0.3 %)	241.336	241.811	-0.475 (0.2%)
G03	5×10^2	247.210	247.260	-0.050 (0.0%)	241.838	241.591	0.243 (0.1%)
G04	10^3	247.455	247.146	0.309 (0.1%)	242.093	241.496	0.597 (0.2%)
G05	5×10^3	247.170	246.883	0.287 (0.1%)	241.790	241.275	0.515 (0.2%)
G06	10^4	247.190	246.679	0.421 (0.2%)	241.804	241.180	0.624 (0.3%)
G07	5×10^4	247.120	246.506	-0.386 (0.2%)	240.666	240.959	-0.293 (0.1%)
G08	10^5	246.285	246.393	-0.108 (0.0%)	240.271	240.864	-0.593 (0.2%)
G09	5×10^5	245.815	246.130	-0.315 (0.1%)	240.178	240.644	-0.466 (0.2%)
G10	10^6	245.450	246.017	-0.567 (0.2%)	239.362	240.549	-1.187 (0.5%)
G11	5×10^6	245.610	245.755	-0.145 (0.1%)	240.620	240.328	0.292 (0.1%)
G12	10^7	246.400	245.642	0.758 (0.3%)	240.352	240.233	0.119 (0.1%)
	1.11×10^{10}		244.129			238.956	

8 结论

- 1) 各种弹簧的试验数据充足, 数据离散性较小, 具有高的可靠性。
- 2) 实验数据的处理, 采用各种方法进行对比, 择其优, 因而具有高的相关性, 保证了数据处理的置信水平。
- 3) 弹簧试样是随机抽取的, 具有产品的代表性, 保证了试验的合理性。
- 4) 弹簧松弛试验是在德国 DV-8 疲劳试验机上进行的, 数据的采集是在显示机上测得, 数据具有高的有效性。
- 5) 55CrSi 等三种钢丝制作的摇架弹簧, 试验说明均具有松弛的稳定性能, 在 1.11×10^{10} 次循环反复作用下, 估计其负荷松弛率均小于 3%, 满足预定的 20 年使用寿命, 具有 99.9% 的可靠性。

作者简介

王德成

职称: 研高级高工
职务: 机械科学研究院副院长
联系地址: 北京首体南路 2 号, 100044
电话: 010-88301815

姜膺

职称: 高工

职务: 机械工业通用零部件产品质量监督检测中心副主任
联系地址: 北京首体南路 2 号, 100044
电话: 010-88301117

王玉山

职称: 高级经济师
职务: 山西经纬合力公司协理机械厂长
联系地址: 山西经纬, 030601
电话: 0354-2493665

周平钢

职称: 工程师
职务: 无锡钢能弹簧研究所总经理
联系地址: 无锡, 214021
电话: 13961824257

张英会

职称: 教授
联系地址: 北京科技大学, 100083
电话: 010-62334469