

机械构件的疲劳寿命可靠性评定

郑朝云

(重庆交通学院, 重庆 400074)

摘要:机械构件的疲劳寿命是其可靠性的一个重要指标.对构件进行疲劳寿命可靠性评定并在此基础上进行优化设计(以疲劳寿命可靠性为目标函数)是一件值得探讨的工作.本文应用以概率论为基础的可靠性评定方法(以一典型的汽车构件为例)来分析机械构件的疲劳寿命可靠性,为在机械设计中引入概率论与随机过程等数学方法作了初步尝试.

关键词:机械构件;疲劳寿命;可靠性评定

中图分类号:TH114 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-716X(2006)01-0145-04

自20世纪70年代以来,随着计算机技术的快速发展及广泛应用,欧美许多发达国家便在其建筑工程结构的可靠性设计标准和规范中引入了以概率论为基础的可靠性理论^[1].

由于各类功能完善的专用应用软件(如MSC/Nastran及Abaqus等)的不断开发和应用,现今不仅单个零件或部件,而且整机或整车均可进行有限元模拟分析,还能实现设计参数、零部件形状等的优化工作.耗机时间也从数天减少至数小时或数分钟.因而把以概率论为基础的可靠性评定(需要计算速度更快、容量占用更大)应用于机械构件的疲劳寿命可靠性分析正在成为可能.

本文提出了一种评定机械构件疲劳寿命可靠性的方法,并用该法对一典型汽车构件(发动机支架总成)进行了疲劳寿命可靠性评定计算.现代机械设计即将进入一个大变革的时期,相信今后在处理机械构件的载荷效应与结构抗力等问题时,会越来越多地应用到概率论与随机过程等数学方法.

1 机械构件的疲劳寿命可靠性评定

机械构件疲劳寿命可靠性评定有6个步骤:1)选取设计参数(如几何尺寸、材料特性等);2)确定实验设计方法;3)计算样本的疲劳寿命;4)建立疲劳寿命的数学模型;5)利用数学模型进行快速随机分布计算,获取疲劳寿命平均值及偏差;6)得出表征疲劳寿命分布的韦布尔分布参数值.

图1为机械构件疲劳寿命可靠性评定的全过程

框图.下面按步骤逐一进行介绍.

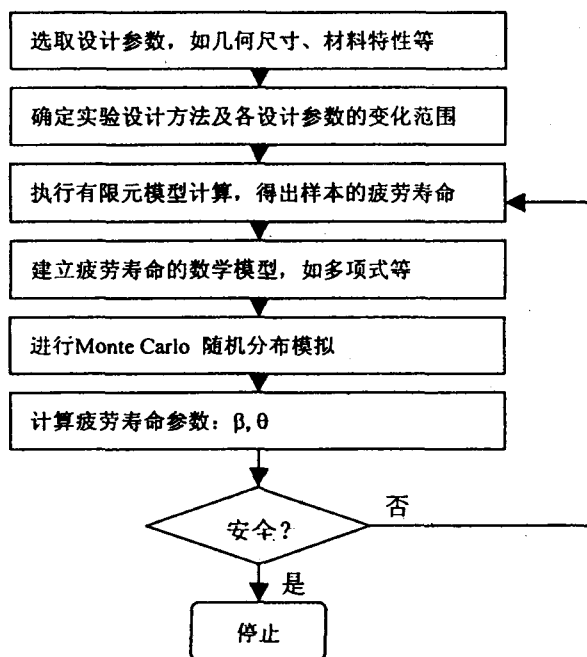


图1 机械结构的疲劳寿命可靠性评定过程

1.1 选取设计参数及确定载荷条件

设计参数的选取,可依照整个构件每次计算时间而定.若每次计算时间较多(如以小时计),则最好不超过5个设计参数;若每次计算时间以几分钟计,则可选数十个参数.本例选取6个参数(均为几何尺寸,即6个构件所用板材的厚度,见图2及实例中的说明).构件的载荷条件可根据实验实测记录或根据

各构件的载荷情况综合而得.本例选取最简单的交 变载荷进行计算^[2].

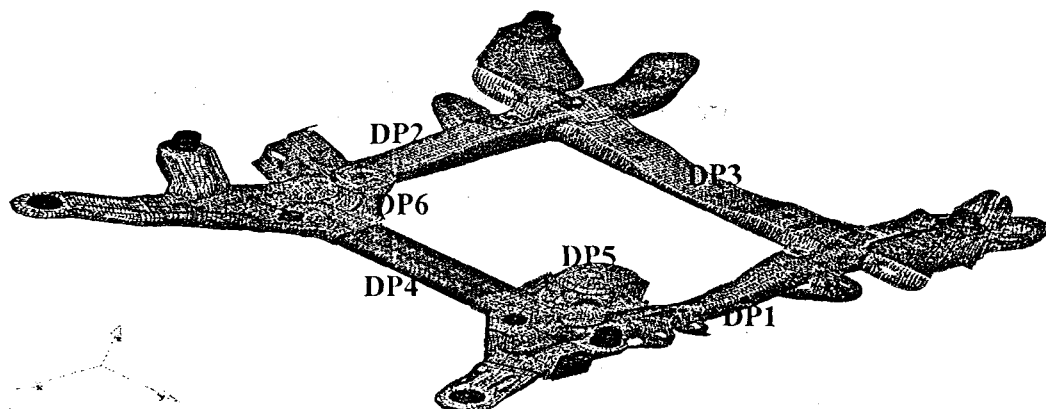


图 2 汽车发动机支架总成的有限元模型

1.2 确定实验设计方法 (DOE, 即 Design of Experiment)

目前较为普遍的实验设计方法有:全因素法、正交设计法^[3]和拉丁方型均匀设计法^[4].

全因素法所需试验次数较多,是因素和试验水平的幂函数.例如,3 因素 2 水平,需 $2^3 = 8$ (次);2 因素 5 水平,需 $5^2 = 25$ (次);5 因素 2 水平需 $2^5 = 32$ (次).故此法仅适合于参数少且水平数少的情形.

正交设计法所需试验次数则大大减少,如 4 因素 2 水平可由全因素法的 $2^4 = 16$ 次减至 8 次^[3].但其缺点是选取样点不够均匀,且试验次数相应于因素和水平不能变动.

近年发展起来的拉丁方型均匀设计法是一种既兼顾减少样本且能均匀取样的新方法,还可依照具体情况增加试验次数以获得更好的结果.本例选取样本数 10 次(见表 1、图 3 和表 2),而最少次数为设计参数数目加 1,即 7 次.

1.3 计算样本的疲劳寿命

根据构件的应力状态进行有限元计算,由足够的设计点样本(改变设计参数得出)计算得出相应的寿命样本.

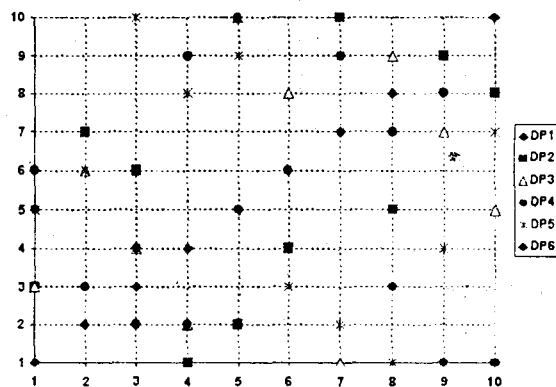


图 3 拉丁方型均匀取样

1.4 建立数学模型

表 1 设计点的拉丁方型样本矩阵

试验 序号	设计参数(mm)					
	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
1	1	3	3	5	5	6
2	2	7	6	7	6	3
3	3	6	4	4	10	2
4	4	1	2	2	8	9
5	5	2	10	10	9	5
6	6	4	8	6	3	4
7	7	10	1	9	2	10
8	8	5	9	3	1	7
9	9	9	7	1	4	8
10	10	6	5	8	7	1

表 2 相应的疲劳寿命样本

试验 序号	设计参数(mm)						疲劳 寿命
	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	
1	2.25	3.06	4.95	5.11	2.51	1.55	10454
2	2.75	4.35	3.48	6.00	1.08	2.27	1242
3	3.25	1.45	3.85	3.78	1.31	3.23	3372
4	3.75	3.71	1.65	3.33	1.55	2.03	850
5	4.25	2.42	2.75	2.44	3.23	1.31	27879
6	4.75	2.74	2.02	4.67	1.79	1.79	43669
7	5.25	4.03	2.38	2.89	2.27	2.99	6934
8	5.75	2.09	3.12	4.22	2.99	2.51	17387
9	6.25	1.77	4.22	5.56	2.03	2.75	30431
10	6.75	3.38	4.58	2.00	2.75	1.08	3337

数学模型的建立主要在于拟合方法的选取,拟合方法的选取应依具体情况而定.如设计参数与响应(这里为疲劳寿命)为线性关系,则可用高斯最小二乘法^[5];若为非线性关系则可采用多项式拟合法^[6].通常取二项式.本例采用二项式拟合法.

1.5 利用数学模型获得随机分布参数

Monte Carlo 法是最古典的一种产生随机数的直接方法,但此法需要较大的样本数才能充分反映其

随机性,故不能直接用以产生随机设计参数值并以此进行计算机模拟计算来取得分布参数,因为这样太耗时.因此,较实用的方法是:先选取较少但具有代表性的样本在设计范围内进行试验或计算机模

拟,然后拟合出数学模型,最后以此数学模型进行快速的 MonteCarlo 随机分布模拟,从而得出样本的平均值及偏差.本例 Monte Carlo 随机模拟 1000 次,计算结果见表 3.

表 3 Monte Carlo 模拟计算结果

序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命	序号	寿命
1	13811	101	5502	201	5965	301	12904	401	5800	501	15346	601	7164	701	7444	801	9710	901	10382
2	6447	102	5888	202	12771	302	13579	402	17521	502	10596	602	9981	702	6325	802	3604	902	11054
3	6466	103	9276	203	8901	303	5966	403	12580	503	10344	603	10568	703	4167	803	12434	903	4317
4	11106	104	4823	204	9324	304	6953	404	14628	504	9169	604	10320	704	7870	804	12434	904	7471
5	5292	105	5035	205	12215	305	5022	405	9507	505	9342	605	14230	705	10991	805	11840	905	8663
6	13510	106	7880	206	5496	306	6624	406	5644	506	8610	606	16455	706	8742	806	11840	906	1960
7	4426	107	16020	207	10637	307	6270	407	18336	507	14501	607	5320	707	5321	807	10352	907	6483
8	4140	108	6496	208	16981	308	11834	408	8423	508	13909	608	8459	708	7948	808	7944	908	11396
9	9735	109	5654	209	7063	309	7968	409	9208	509	2411	609	9165	709	8648	809	7944	909	8920
10	8663	110	9042	210	5280	310	6916	410	9108	510	15134	610	10854	710	10736	810	14131	910	7382
11	11081	111	14331	211	15251	311	14898	411	7777	511	9392	611	5832	711	11212	811	4570	911	4430
12	8938	112	6855	212	11641	312	7019	412	8660	512	8474	612	11942	712	9863	812	8705	912	7682
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
89	6605	189	12896	289	9037	389	13748	489	5245	589	7346	689	10194	789	11869	889	6552	989	7366
90	4513	190	7591	290	8514	390	13211	490	436	590	14726	690	21992	790	14329	890	4879	990	7396
91	7476	191	12861	291	6145	391	6979	491	6667	591	10721	691	12753	791	12522	891	3554	991	20195
92	6054	192	6644	292	5849	392	10169	492	14364	592	7673	692	4012	792	10171	892	4783	992	11836
93	3860	193	14096	293	4980	393	8444	493	10508	593	12382	693	9701	793	9579	893	11005	993	12128
94	10433	194	6041	294	6811	394	6790	494	9265	594	7196	694	6823	794	7143	894	2982	994	8058
95	11963	195	17386	295	5857	395	12039	495	8887	595	7788	695	5041	795	15040	895	4614	995	9714
96	16047	196	6678	296	7759	396	12039	496	9818	596	3718	696	9355	796	10679	896	6304	996	6682
97	6655	197	7611	297	6285	397	6609	497	12030	597	14374	697	11887	797	23619	897	8832	997	5284
98	10392	198	8446	298	6475	398	5816	498	8108	598	5703	698	11141	798	12353	898	3983	998	7030
99	6901	199	10421	299	6348	399	6119	499	6683	599	7893	699	8262	799	7493	899	18300	999	5634
100	5531	200	11695	300	5051	400	13570	500	11771	600	9517	700	13978	800	4953	900	13482	1000	16624

1.6 计算疲劳寿命分布的韦布尔参数值^[7]

由随机分布的样本平均值与偏差,按照如(1)、(2)两式可计算出表征疲劳寿命可靠性的指标:

$$\frac{s}{\mu} = \frac{\sqrt{\Gamma(1 + 2/\beta) - \Gamma^2(1 + 1/\beta)}}{\Gamma(1 + 1/\beta)} \quad (1)$$

和

$$\theta = \frac{\mu}{\Gamma(1 + 1/\beta)} \quad (2)$$

式中,μ 和 S—— 上一步计算所得的疲劳寿命平均值和标准偏差;Γ—— 伽玛函数;β—— 表征韦布尔分布的斜率;θ—— 特征值.

2 汽车发动机支架总成的疲劳寿命可靠性评定(实例)

本文对汽车发动机支架总成的疲劳寿命可靠性评定作了初步探讨.如果所要求的两个疲劳寿命参

数—— 韦布尔分布斜率 β 大于或等于 2 和特征值 θ 大于或等于 10,000,则表明构件会有 63.2% 的疲劳寿命样本大于或等于 10,000 次循环,亦即构件的疲劳寿命可靠性能够满足要求.实例构件的有限元模型如图 2,有 28,521 个板壳单元和 25,326 个结点.图中 DP1 ~ DP6 为 6 个设计参数,分别为支架总成的右纵梁、左纵梁、前横梁、后横梁、发动机右支架和左支架的板材厚度,初始值 DP1 = 4.5、DP2 = 2.9、DP3 = 3.3、DP4 = 4.0、DP5 = 2.15、DP6 = 2.15,单位为 mm.表 1 和图 3 为用拉丁方型均匀设计法所作的均匀取样,作为输入值的分布样本.表 2 为相应的疲劳寿命样本,即样本的疲劳寿命计算结果.表 3 为 Monte Carlo 模拟计算结果(为减少篇幅,此表经过简化处理).图 4 为疲劳寿命的韦布尔分布.有限元模拟计算一次需占用 CPU50s,实际计算时间约

2min. 该构件的疲劳寿命可靠性评定所需总时间约为 1h. 对于汽车车架常用材料(如 Q235) 及 30% 的设计参数变化范围, 计算所得的韦布尔分布的斜率 β 为 2.51, 特征值 θ 为 10,533. 计算结果表明: 本例构件 63.2% 的疲劳寿命样本大于或等于 10,533 次循

环, 即构件的疲劳寿命可靠性能够满足要求; 否则, 可增加构件板材的厚度或者选用其它材料(即改变设计参数) 以达到结构的疲劳寿命可靠性要求 - 这一过程实际上是以构件的疲劳寿命可靠性为目标函数的优化设计工作.

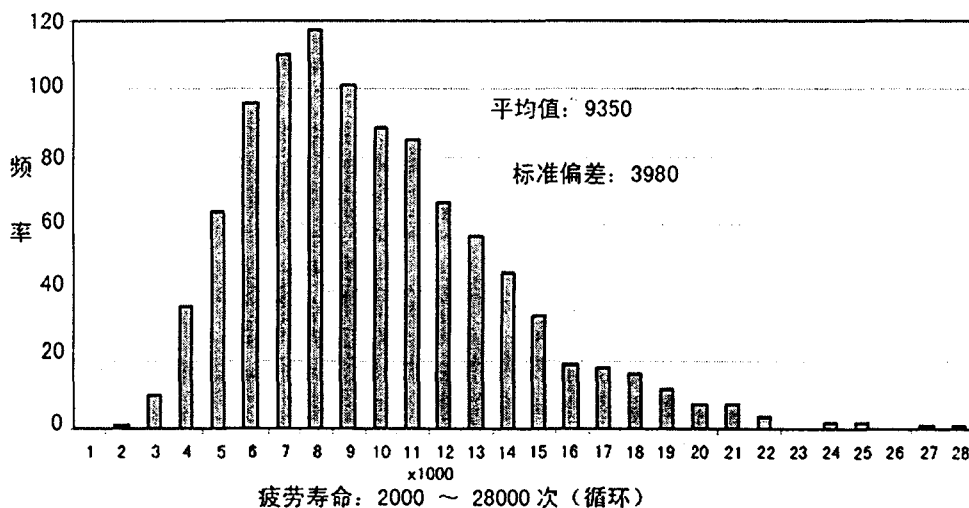


图 4 疲劳寿命的韦布尔分布

3 结 语

本文对汽车构件所作的疲劳寿命可靠性分析清楚地表明: 利用计算机技术的快速发展及各类应用软件的不开发所带来的便利, 把概率论与随机过程等数学方法引入机械设计已成为可能, 为解决机械设计传统方法以往无法处理的技术问题开辟了路径. 有理由相信, 随着这类全新尝试的研究工作的不断进展, 必定会有助于机械设计水平的提高和现代化发展.

参考文献:

[1] 余安东, 叶润修. 建筑结构的安全性及可靠性[M]. 上

海: 上海科技文献出版社, 1986: 17-35.

[2] 孙训方. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

[3] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 人民出版社, 1979: 853-860, 1368-1381.

[4] 张金廷. 拉丁方型均匀设计[D]. 北京: 中科院应用数学所, 1991.

[5] 浙江大学数学系高等数学教研组. 概率论与数理统计[M]. 北京: 人民出版社, 1973: 306-320.

[6] CHARLES R. Hicks, et al. Fundamental Concepts in the Design of Experiments[M]. New York: fifth Edition, 1999: 403-441.

[7] WILLIAM Q. Meeker, Luis A. Escobar. Statistical Methods for Reliability Data[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1998: 85-86.

Assessment of fatigue-life reliability of mechanical parts

ZHENG Zhao-yun

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The fatigue-life of a mechanical part is a very important index for its reliability. Leading an assessment of fatigue-life and reliability, which can be used further as an objective function in an optimal design of the part, is a meaningful thing. In this paper, an assessment of fatigue-life and reliability of a typical automobile part was conducted based on the theory of probability as a new application of probabilistic and stochastic methods in mechanical design.

Key words: mechanical part; fatigue-life; reliability assessment