

文章编号: 1007- 2985(2006) 01- 0075- 05

复杂机电系统全寿命设计研究*

陈举华, 张丽丽, 张洪才
(山东大学机械工程学院, 山东 济南 250061)

摘要:以齿轮全寿命试验为例, 指出全寿命设计可持续发展必须依赖于小子样系统研究, 并提出小子样系统的 2 种研究策略, 即数值模拟研究和虚拟样机研究。

关键词:复杂机电系统; 全寿命设计; 可靠性设计; 小子样系统; 数值模拟; 虚拟样机

中图分类号: TH132. 4

文献标识码: A

1 复杂机电系统全寿命设计研究的意义

1.1 生产线的高可靠性要求

国民经济的高速发展, 对生态环境保护提出了更高的要求, 生产线可视化将顺此呼之而出, 这样才能提升现有设备的利用率和相互协调性, 以达到国民经济的增长与环境保护相协调。图 1 是高炉生产大系统的示意图。要使高炉炼铁高效、低耗, 达到精良生产的要求, 就要使单元 1 上料系统、单元 2 炉顶装置系统、单元 3 高炉冶炼系统三环节具有高可靠性和相互协调性, 最终使整个炼铁生产线产值的增长与能源的有效利用达到更高的水平。以莱钢铁企业中型高炉为例, 1999—2002 年, 高炉无钟炉顶装备(单元 2)的可靠性提高到 80%, 高炉(单元 3)的休风率大大降低, 相应高炉技术经济得以提升, 平均每年创造经济效率 $(6\sim 7) \times 10^8$ 元。

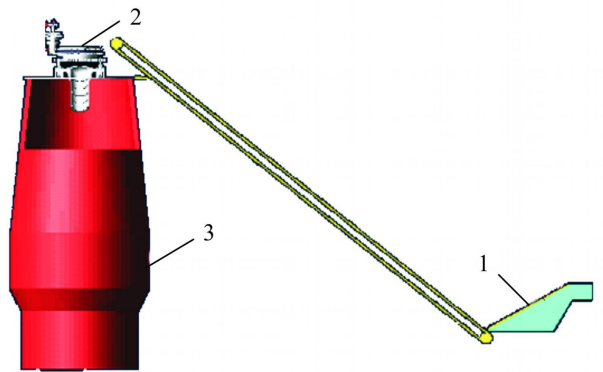


图 1 高炉生产大系统

中国发电系统装备每年可靠性多提高 1%, 就可争创经济效益 $(3\sim 4) \times 10^{10}$ 元。大量实例说明, 复杂机电系统全寿命研究不但与国计民生息息相关, 也与节约资源、保护环境相关。

1.2 装备结构复杂而引发的事故概率增多

例如飞机, 1920 年前无机载电子设备, 1940 年以后发展到上千件电子元件, 到 1960 年后增加到上万件。1969 年发射的 Appolo 宇宙飞船, 由 710 万个零件组成。设备自动化程度要求高, 功能要求全, 由此导致机电产品的失效概率也随之增高, 只要某一零部件失败, 都可能导致整机失败。水星 1 号火箭因 1 个程序字符脱落而导致发射失败, 经济损失重大。1979 年 3 月 26 日, 美国三里岛核电站放射性物质泄露造成严重污染, 当时轰动了全世界。

1.3 减少因维修所致国家财政的投入

世界各国对设备的维修费用投入一般都很高。1961 年美国国防部预测中, 至少有 25% 用于维修方面;

* 收稿日期: 2005- 05- 12

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2002F19)

作者简介: 陈举华(1948-), 女, 山东省荣成人, 山东大学机械工程学院教授, 博士生导师, 主要从事多目标模糊优化、系统模糊可靠性等研究。

前苏联有资料表明,在产品寿命期内,下列产品维修费与购置费之比为:飞机 5:1,汽车 6:1,机床 8:1,军事装备 10:1.

机电产品全寿命设计后,产品在工作期限内的维修率大大降低,用于维修的国民经济投入也会大大降低.以莱钢铁企业高炉炉顶设备为例,炉顶设备可靠性的提升不但大大削减了维修费用,设备投资也降低了 1/2.

1.4 变装备事后安全性评估为事先主动可靠性设计

当前机械设计正处在变革时代,从传统的安全系数法向可靠性设计进步,这是因为传统静强度设计不能保证在使用期限内零部件及系统可靠地工作,致使一些机电产品尤其是重大装备事故频繁出现.据美国统计,因变度载荷疲劳破坏导致的事故占机电产品事故的 95%.因此,由可靠性设计完成产品使用期限无故障是十分必要的.目前,国外一些先进国家已进入指定寿命下可靠性设计阶段,即借助于材料疲劳全寿命试验积累,利用可靠性设计及虚拟现实技术对产品进行指定工作期限无故障的全寿命设计.目前,中国的机电产品设计还达不到这一水平,通常是产品工作定型后对安全性作事后评估,这样会使新产品的的设计、制造可靠性不足,造成可靠性事故隐患.以某一行业行星减速器为例,在设计中,视齿轮应力与强度等为一常量,但实际上由于载荷和工况系数等参数的随机性,应力和强度也存在一定的概率分布规律,因此按照传统的设计方法,将不可避免地出现浪费或可靠度(可靠性的定量指标)不足,难以体现行星齿轮传动的优势.

笔者结合 55 kW 风力发电机组的双级行星齿轮减速器(型号略),进行可靠性-混合离散变量的优化设计.双级行星齿轮减速器的主要参数见文献[1],将行星齿轮传动体积最小(重量最轻)定为优化目标.双级行星齿轮传动虽然比单级传动复杂,但就体积而言,该型号双级行星齿轮传动可以认为是高、低速单级行星齿轮传动之和.

高速级目标函数为(高速级参数加注下标 h)

$$f_h(X) = 0.19635x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3(4 + (k-1)^2c) \rightarrow \min,$$

$$X = (m_h \quad Z_{ah} \quad b_h)^T = (x_1 \quad x_2 \quad x_3)^T.$$

其中: c 为行星轮个数,事先选定; k 为内传动比, $k = Z_b/Z_a$; m 为齿轮模数; b 为有效齿宽; Z_a, Z_b 为太阳轮、内齿轮齿数.

采用混合离散变量的优化方法,各变量取值为 $x_1 = 3, 4, 5, 6, 8, 10$; $x_2 = 20, 21, \dots, 30$; $x_3 = 20, 21, \dots, 60$.初始点选原设计参数以便于比较, $X_0 = (4 \quad 25 \quad 50)^T$.

低速级目标函数为(低速级加注下标 l)

$$f_l(X) = 0.19635x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3(4 + (k-1)^2c) \rightarrow \min,$$

$$X = (m_l \quad Z_a \quad b_l)^T = (x_1 \quad x_2 \quad x_3)^T.$$

各变量取值为 $x_1 = 3, 4, 5, 6, 8, 10$; $x_2 = 17, 18, \dots, 30$; $x_3 = 20, 21, \dots, 80$.

由高、低速级目标函数可见,高、低速级目标函数性态好,容易求全局最优解,所以双级行星齿轮传动的目标函数可由高、低速目标函数组合而得.

整体寻优,由高、低速级目标函数的变量组合,得含 6 个变量的双级行星齿轮传动目标函数为

$$f(X) = \omega_h \cdot f_h(X) + \omega_l \cdot f_l(X) \rightarrow \min,$$

其中 ω_h, ω_l 分别为高、低速级目标函数的加权因子.

GB3480-83 规定,“要求在很长的使用寿命内有较高可靠性”的齿轮传动,其可靠性应大于 98%.因为 55 kW 风力发电机组选用的行星齿轮传动较为重要,所以其接触与弯曲疲劳可靠性指标应涉入此列.但通过计算(仅计算系统可靠度,未优化处理)可知,某型号双级行星齿轮传动的每对(个)齿轮的可靠度不尽合理(见表 1).

通过表 1 可看出,当重视系统可靠性设计(即优化设计)时,高速级可靠性略有降低,以减少盲目提高可靠性的不必要浪费,低速级可靠性提升,使得整机的可靠性大大提升,符合可靠性设计要求.

表 1 双级传动 U_H, U_F 的约束值

| | $g_1(X)$ | $g_2(X)$ | $g_3(X)$ | $g_4(X)$ | $g_5(X)$ | $g_6(X)$ | $g_7(X)$ | $g_8(X)$ | $g_9(X)$ | $g_{10}(X)$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|
| 可靠性优化前 | - 3.23 | - 3.56 | - 5.62 | - 4.04 | - 3.89 | 1.01 | 2.67 | 1.26 | 2.55 | 1.97 |
| 可靠性优化后 | - 0.05 | - 0.97 | - 2.61 | - 1.04 | - 0.89 | - 1.90 | - 0.01 | - 1.75 | - 0.46 | - 1.32 |

数学模型中 g_1, g_2 为高速级齿面接触疲劳可靠度约束条件; g_3, g_4, g_5 为高速级齿根弯曲疲劳可靠度约束条件:

$$g_1(X) = 2.33 + 17.966 - 3.9 \ln[x_1^2 x_2 x_3 / (23 + x_2)] \leq 0,$$

$$g_2(X) = 2.33 + 18.686 - 7.353 \ln(x_1 \sqrt{x_3}) \leq 0,$$

$$g_3(X) = 2.33 + 20.598 - 4.270 \ln(x_1^2 x_3) \leq 0,$$

$$g_4(X) = 2.33 + 22.17 - 4.27 \ln(x_1^2 x_3) \leq 0,$$

$$g_5(X) = 2.33 + 22.26 - 4.26 \ln(x_1^2 x_3) \leq 0.$$

同理, 低速级 g_6 和 g_7 为齿面接触疲劳强度条件, g_8 和 g_9 为齿根弯曲疲劳强度条件.

1.5 等疲劳设计的需求

中国现行的安全系数法仅对紧固件注意到了等疲劳设计, 即连接用的紧固件组合, 如螺栓、垫片、螺母在设计和选用时就按等疲劳寿命组合. 等疲劳设计, 就是规定某一机电产品在服役期间主要零部件的疲劳寿命相当. 但目前系统零部件的设计还未细化至此, 这是因为等疲劳设计中参数变化是非常灵敏的, 只有与全寿命设计中随机载荷相匹配, 才能充分发挥其效益. 例如, 齿轮传动零部件按文献[2] 作弯曲疲劳强度设计时, 采用 $\sigma_F = \frac{KF_t}{bm} Y_{Fa} Y_{Sa} Y_\epsilon Y_\beta \leq [\sigma_F]$ 计算. 其中: σ_F 为对数正态分布, K 为计算齿轮的载荷系数, F_t 为工作载荷, b 为理论齿宽, m 为模数, Y_{Fa} 为齿形系数, Y_{Sa} 为应力修正系数, Y_ϵ 为重合度系数, Y_β 和 $[\sigma_F]$ 分别为计算齿轮的螺旋角系数、许用应力. 若一对齿轮等弯曲疲劳设计, 则 $\sigma_{F主} \approx \sigma_{F从}$, 即

$$\frac{[\sigma_F]_{主}}{Y_{Fa主} Y_{Sa主}} = \frac{[\sigma_F]_{从}}{Y_{Fa从} Y_{Sa从}}.$$

相互耦合或组合的零部件采用等疲劳设计也会大大减少维修费, 实现机电产品的系统可靠性的合理分配, 最终实现整个机电产品的全寿命疲劳设计.

2 全寿命设计可持续发展依赖于小子样系统研究

机电产品尤其是重大机电产品对国计民生关系重大, 因此解决该产品使用期限内无故障的全寿命设计, 具有极高的经济价值和十分深远的应用前景. 但是, 目前该类研究主要依赖大样本, 以系统的比较复杂的零部件——齿轮全寿命试验为例, 全寿命设计依据大样本试验太复杂、太浪费.

2.1 齿轮全寿命试验准备工作

2.1.1 试件制作及刀具参数测量 根据 GB/T14230—93《齿轮弯曲疲劳强度试验方法》, 某材料齿轮试件要求为 m (模数) = 5 mm, Z (齿数) = 30, b (齿宽) = 10 mm; 精度等级为 7GH (GB10095—88), 齿根表面粗糙度 $R_z \leq 10 \mu m$; 热处理工艺为调质 HB230 ~ 260, 齿面淬火 HRC45 ~ 50.

齿轮试件加工后 (在齿面硬化前), 先要检测加工齿轮试件的蜗轮滚刀, 试件的齿圈径向跳动 ΔF_r 、公法线长度变动 ΔF_w 、齿形误差 Δf_f 、基节偏差 Δf_{pb} 、齿向误差 ΔF_β 和齿面与齿根的粗糙度 R_z , 是否符合 GB10095—88 的 7 级精度齿轮标准.

2.1.2 试件精度检测 根据 GB10095—88 渐开线圆柱齿轮 7 级精度指标, 从使用要求出发, 对各类产品的齿轮传动而言, 试件精度要求可归纳为 4 个方面: (1) 传动的准确性; (2) 传动的平稳性; (3) 载荷分布的均匀性; (4) 齿轮副侧隙.

由此选取的齿轮误差项目检验组及指标为: (1) 齿圈跳动公差 $F_r = 0.056$ mm; (2) 公法线长度变动公差 $F_w = 0.036$ mm; (3) 齿形公差 $f_f = 0.016$ mm; (4) 基节极限偏差 $\pm f_{pb} = \pm 0.018$ mm; (5) 齿向公差 F_β

= 0.011 mm; (6) 公法线平均长度 W 及其上、下偏差 (E_{wms}, E_{wmi}) = $53.763_{0.16}^{0.12}$.

2.1.3 试件材料性质测量 对齿轮试件进行化学成分分析(依据 GB3077—88)、常规机械性能分析(依据 GB228—76)、材料的非金属夹杂物分析(依据 GB10561—89)、材料的晶粒度测试(依据 YB27—77), 各项指标都在允许范围内.

2.1.4 试件的热处理 通过反复摸索得出: 选用大功率淬火设备(功率 1 000 kW)、严格控制感应加热时间(2 s)、油作为冷却介质的最佳淬火工艺, 最终达到了理想的淬透层和金相组织(见图 2).

2.1.5 试件夹具制作 齿轮弯曲疲劳试验在脉动疲劳试验机上进行, 根据需要制作了将齿轮受载情况真实再现的夹具, 采用双齿加载方式(见图 3).

2.2 齿轮全寿命试验及数据分析

2.2.1 试验齿轮的抽样 为了保证抽样的随机性和均等性, 抽样示意图见图 4. 试验采用成组法, 取 4 级载荷水平, 可采用试探法寻求最高载荷和最低载荷. 齿轮承受最高载荷时, 寿命(应力循环次数) 在 10^5 左右; 齿轮承受最低载荷时, 寿命接近其循环基数, 4 级载荷水平间隔由经验和试探法得出.

依据 GB/T14230—93, 失效依据为试验机声音突变, 频率下降 10% 左右, 或齿轮完全断裂, 试验机自动停机.

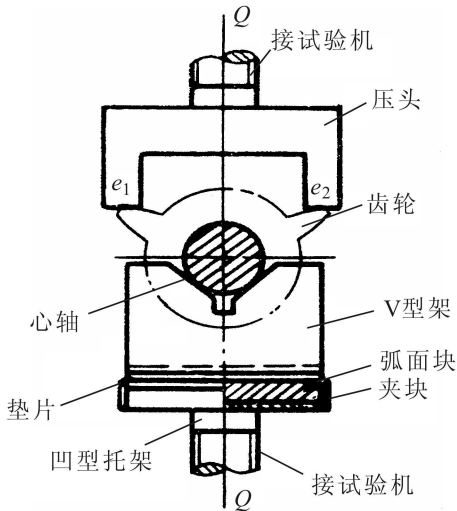


图 3 弯曲试验夹具

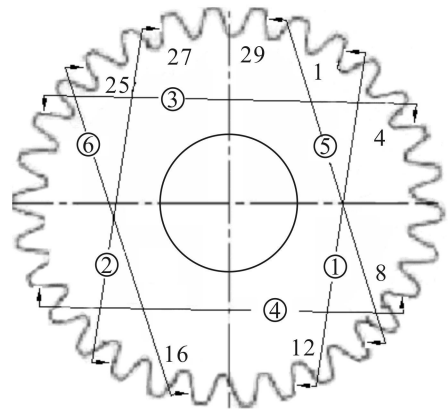


图 4 试验齿轮抽样

2.2.2 弯曲疲劳全寿命试验 GB/T14230—93《齿轮弯曲疲劳强度试验法》允许采用 B 试验法, 在机械部机械科学研究院的英国产 INSTRON1603 型电磁谐振疲劳试验机上完成.

齿轮全寿命试验数据见表 2.

表 2 某材料齿轮弯曲疲劳试验寿命数据

× 10⁶

| 序号 | $S_1 = 314.27 \text{ MPa}$ | $S_2 = 264.59 \text{ MPa}$ | $S_3 = 228.10 \text{ MPa}$ | $S_4 = 211.41 \text{ MPa}$ |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0.152 | 0.260 | 0.380 | 0.765 |
| 2 | 0.187 | 0.289 | 0.464 | 0.815 |
| 3 | 0.188 | 0.317 | 0.500 | 0.898 |
| 4 | 0.190 | 0.326 | 0.566 | 0.920 |
| 5 | 0.230 | 0.342 | 0.611 | 0.946 |

续表

| 序号 | $S_1 = 314.27 \text{ MPa}$ | $S_2 = 264.59 \text{ MPa}$ | $S_3 = 228.10 \text{ MPa}$ | $S_4 = 211.41 \text{ MPa}$ |
|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 6 | 0.240 | 0.390 | 0.617 | 0.962 |
| 7 | 0.314 | 0.507 | 0.637 | 1.121 |
| 8 | 0.331 | 0.629 | 0.703 | 1.165 |
| 9 | — | — | 0.936 | 2.106 |
| 10 | — | — | 1.215 | > 3.0 |
| 11 | — | — | 1.981 | > 3.0 |
| 12 | — | — | > 3.0 | > 3.0 |

2.2.3 全寿命试验数据分析 齿轮寿命既遵从二参数威尔分布, 又遵从对数正态分布. 从表 3 可看出, 按对数正态处理更为合理(数据略优).

表 3 寿命数据拟合结果

| 应力水平 | 按威布尔分布拟合 | | | 按对数正态分布拟合 | | |
|-------|------------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | $b/ \times 10^5$ | k | r | μ | σ | r |
| S_1 | 3.043 65 | 3.788 137 | 0.939 242 | 12.519 666 | 0.378 750 | 0.964 231 |
| S_2 | 5.225 71 | 3.029 545 | 0.941 675 | 13.030 499 | 0.469 164 | 0.975 845 |
| S_3 | 13.876 84 | 1.977 350 | 0.872 545 | 13.960 908 | 0.753 016 | 0.918 374 |
| S_4 | 19.764 28 | 2.501 208 | 0.767 412 | 14.397 367 | 0.637 588 | 0.811 858 |

上述全寿命试验方法不但适用于零部件, 还适用于机电产品整机. 全寿命试验是产品全寿命设计的基础, 因为由 $R - S - N$ 曲线可知, 当材料应力(S) 和产品可靠性(R) 确定后, 就可设计得产品的确定寿命. 全寿命试验的理论基础是概率论, 试验及数据分析的必备条件是大样本, 而大样本的概率试验必然以浪费资源、污染环境为代价, 这也制约了全寿命设计及可靠性研究的可持续发展. 因此, 发展可靠性研究要攻克的关键难题为小子样系统研究, 即建立以节约资源、保护环境为宗旨的小子样系统理论框架, 采用小子样先进技术相互渗透的研究策略, 以建立小子样系统的研究方法.

3 小子样系统的研究策略

全寿命设计以概率论为基础, 产品评估的安全性、可靠性也以此为基础, 因此小子样系统研究决不能以削减概率意义为目的, 充分利用被研究系统已有的信息才是切实可行的途径, 此方法也应力求与环境相融合. 图 5 是研究策略及实施(GM 及灰关联方法见文献[3], 模糊及小子样研究见文献[4-8]).

数值模拟研究充分利用了系统已有的小子样本及系统的辅助信息, 使建立的全寿命设计概率模型具有与大样本相同的坚实概率基础.

虚拟样机研究借助于计算机及其他学科先进成果, 将推进虚拟可视化样机—虚拟物理样机—虚拟全寿命样机的研究进程.

在推进虚拟可视化样机—虚拟样机的进程中, 取得了山东省 2002 年科技进步一等奖的成果, 其虚拟物理样机见图 5. 其中虚拟生物人能够通过样机全寿命工作过程的可视化再现, 彻底解决了全寿命设计与环境不相容的难题.

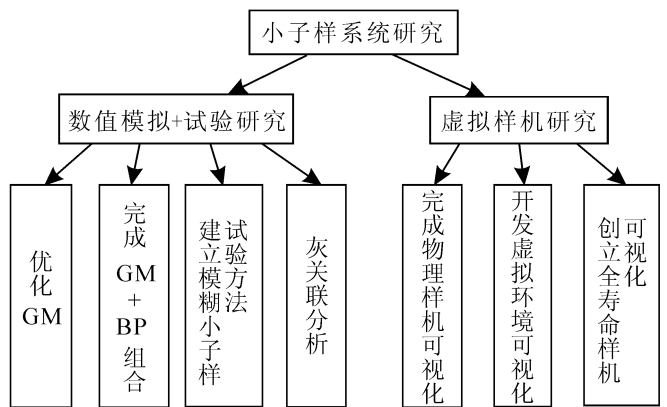


图 5 小子样系统研究策略

(下转第 128 页)

细,就是细致.如稿子改好以后再细心通读一遍,这样可以避免漏改,更可以避免改错.

勤,就是勤快.在编辑加工过程中一旦发现疑问,就应立即予以核实,不能以“文责自负”为由,将责任归咎于作者.

谦,就是谦虚,不骄傲自满.在工作中出现自己解决不了的难题,应虚心向作者、专家请教,不可想当然、自以为是.

4 结语

影视界有一句名言:“电影是一门遗憾的艺术.”从某个意义上说,期刊也是一种“遗憾的媒体”.期刊编辑在编辑加工稿件时,要求不出现任何差错是不现实的,也是不可能的.所以,只有不断学习,按照编辑加工的要求,遵循科学的编辑加工方法操作,才能尽量减少或避免某些差错.

参考文献:

- [1] 陆炳麟.怎样当新闻编辑[M].北京:新华出版社,1992.
- [2] 陈灿华.关爱自家已出版的期刊[J].中国科技期刊研究,2003,14(1):94-95.
- [3] 陈灿华.科技期刊中差错的表现形式及消除方法[J].湖南大学学报(社会科学版),2001,15(4):126-129.

Some Problems that Must be Taken into Account in the Process of Editing and Processing

CHEN Can-hua

(Editorial Department of Journal of Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Some problems in the process of editing and processing, such as the requirements, methods and points for attention, were studied. It is concluded that mistakes can be reduced or avoided only when editors obey the principles of accuracy, clarity and simplicity, respect facts and science, respect and protect authors' copyright, and form a good working habit.

Key words: editing; processing; mistakes

(责任编辑 向阳洁)

(上接第 79 页)

参考文献:

- [1] 东北工学院《机械零件设计手册》编写组.机械零件设计手册[M].北京:冶金工业出版社,1982.
- [2] 国家齿轮强度课题组.国家标准“渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法”的介绍[J].齿轮,1983,7(4):1-90.
- [3] 孟广武.灰色系统理论[M].济南:山东科技出版社,1994.
- [4] 陈举华,于浩.硬面齿轮弯曲疲劳可靠性仿真试验研究[J].中国机械工程,1999,10(1):7-9.
- [5] 陈举华,秦惠芳.小子样机械系统可靠性分析与预测研究[J].农业机械学报,1999,30(6):31-35.
- [6] 安艳秋.基于进化神经网络仿真试验的复杂机械系统可靠性预测[D].济南:山东大学出版社,1999.
- [7] 郭毅之.小子样复杂机械系统可靠性研究[D].济南:山东大学出版社,2001.
- [8] 张洪才.小子样复杂机械系统可靠性分析与预测理论与应用研究[D].济南:山东大学出版社,2003.

Study on the Whole Life Design of Complex Electromechanical System

CHEN Ji-hua, ZHANG Li-li, ZHANG Hong-cai

(School of Mech. Eng., Shandong Univ., Jinan 250061, China)

Abstract: The article takes the whole-life experimentation of the gear for example, points out that the sustainable development of whole-life design must base on the study of few sampling, and brings forward two kinds of strategies of the study on the few sampling: the study on the numerical simulations and the study on the virtual prototype technology.

Key words: complex electromechanical system; whole-life design; reliability design; few sampling; numerical simulations; virtual prototype technology

(责任编辑 陈炳权)