

• 试验研究 •

大型升船机运行工况的计算机动态仿真的研究

Study of computer dynamic simulation on running workcases of largesize shiplift

王君, 吴功平, 肖晓晖

(武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:以三峡垂直升船机为研究对象, 用动态子结构法分别对升船机的正常工况、一根同步轴断裂和两台电动机失效等故障工况进行建模和计算机动态仿真计算。计算结果表明, 这两种故障工况与正常工况的动力学特性没有明显的变化, 从而从理论上证明了升船机在故障工况时也能保证安全、可靠运行。

关键词:升船机; 运行工况; 动态仿真。

中图分类号:TP391.9; U642.1 **文献标识码:**B **文章编号:**1006—6446(2001)04—0014—03

0 引言

升船机是水利枢纽的主要通航设备, 它的特点是在水利枢纽水头较高的情况下, 把船只快速运送过坝, 减少水资源的浪费。基于当今形势, 研究、发展升船机已在我国水利界达成共识。

计算机仿真是以计算机为手段, 对实际系统的模型进行实验研究的过程。本文的目的就是通过对三峡升船机系统的仿真, 考察系统的动态特性, 如系统各主要部件的振动位移、振动速度以及振动加速度等。从而从理论上证明了升船机在两种故障工况下能够安全、可靠地运行。

1 系统建模

仿真模型采用动态子结构法, 分两级, 简图见图 1。

根据对三峡垂直升船机结构分析, 把此机械系统分为 8 个对称部分, 每个对称部分称为一个一级子结构, 那么该系统有 8 个一级子结构, 每个一级子结构又分为 6 个二级子结构, 它们分别为: 电动机和工作制动轮为子结构 a; 减速器为

子结构 b; 横、纵向同步轴分别为子结构 c、d; 一个卷筒、安全制动器、重力平衡重、转矩平衡重、承船厢组成子结构 e。子结构 a 与子结构 b、子结构 b 与子结构 c、子结构 b 与子结构 d 分别通过鼓形齿式联轴器联接, 而子结构 b 与子结构 e1、子结构 b 与子结构 e2 通过减速器的第六根轴直接相联接。

1.1 建立系统动力学方程前的假设

- 1) 各提升绳上受力是均匀的;
- 2) 系统可简化为质量—弹簧模块;
- 3) 电动机驱动力矩被视为阶跃函数;
- 4) 整个系统由 8 套传动装置利用同步轴机械地连接组成, 并认为机械部分在制造和安装上都是相同的。

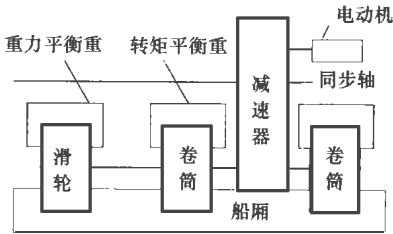
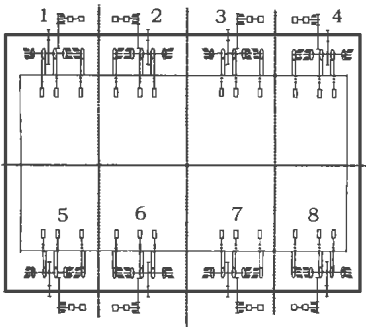


图 1 仿真模型简图

收稿日期: 2001—03—12

作者简介: 王君 (1969—), 男, 辽宁沈阳人, 武汉大学在读硕士研究生, 机械设计与理论专业。

1.2 正常工况模型

运动方程: $M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = T$

其中:

$$M = \begin{vmatrix} M_1 & & & & & & & \\ & M_2 & & & & & & \\ & & M_3 & & & & & \\ & & & M_4 & & & & \\ & & & & M_5 & & & \\ & & & & & M_6 & & \\ & & & & & & M_7 & \\ & & & & & & & M_8 \end{vmatrix},$$

$$C = \begin{vmatrix} C_1 & & & & & & & \\ & C_2 & & & & & & \\ & & C_3 & & & & & \\ & & & C_4 & & & & \\ & & & & C_5 & & & \\ & & & & & C_6 & & \\ & & & & & & C_7 & \\ & & & & & & & C_8 \end{vmatrix},$$

$$K = \begin{vmatrix} K_1 & & & & & & & \\ & K_2 & & & & & & \\ & & K_3 & & & & & \\ & & & K_4 & & & & \\ & & & & K_5 & & & \\ & & & & & K_6 & & \\ & & & & & & K_7 & \\ & & & & & & & K_8 \end{vmatrix}.$$

$X = [X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4 \ X_5 \ X_6 \ X_7 \ X_8]^T; T = [T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ T_6 \ T_7 \ T_8]^T$ 。 $M_i, C_i, K_i, X_i, T_i (i=1,2,3,4,5,6,7,8)$ 分别为各一级子结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、位移列向量以及力列向量。

$$M_i = \begin{vmatrix} M_a & & & & & \\ & M_b & & & & \\ & & M_c & & & \\ & & & M_d & & \\ & & & & M_{e1} & \\ & & & & & M_{e2} \end{vmatrix},$$

$$C_i = \begin{vmatrix} C_a & & & & & \\ & C_b & & & & \\ & & C_c & & & \\ & & & C_d & & \\ & & & & C_{e1} & \\ & & & & & C_{e2} \end{vmatrix},$$

$$K_i = \begin{vmatrix} K_a & & & & & \\ & K_b & & & & \\ & & K_c & & & \\ & & & K_d & & \\ & & & & K_{e1} & \\ & & & & & K_{e2} \end{vmatrix}.$$

$X_i = [X_a \ X_b \ X_c \ X_d \ X_{e1} \ X_{e2}]^T; T_i = [T_a \ T_b \ T_c \ T_d \ T_{e1} \ T_{e2}]^T$ 。 $M_j, C_j, K_j, X_j, T_j (j=a, b, c, d, e1, e2)$ 分别为各二级子结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵、位移列向量以及力列向量。

1.3 一根同步轴断裂工况模型

从一级子结构 1 中找出二级子结构 C 的阻尼矩阵 C_c 和刚度矩阵 K_c , 将其中的相应参数置零。

1.4 两台电动机失效工况

令 1,2 一级子结构中两台电动机的驱动力矩为零。

2 仿真分析

2.1 仿真的环境

由于 MatLab 在数值计算方面的突出能力, 所以本文作者采用 MatLab 作为计算机仿真的平台。事实上, 在研究开发中, 使我们受益的不仅是 MatLab 的计算能力, 它的一系列工具也为我们节约了大量的时间。

2.2 仿真算法

本文作者采用 Wilson θ 法作为仿真计算瞬态响应的数值计算方法。最早对常微分方程进行数值积分求解研究的是 Euler, 在此基础上, Gauss, Newmark 先后改进、完善了 Euler 的数值积分方法。Wilson 以 Newmark 线性加速度法为基础, 引入参数 $\theta \geq 1$, 在时域 $t + \theta \times \Delta t$ 范围内, 假设加速度线性变化在数学上先得到 $t + \theta \times \Delta t$ 瞬时的一组方程, 而后再求出 $t + \theta \times \Delta t$ 瞬时的位移、速度、加速度的校对方程。Wood 证明了当 $\theta \geq 1.37$ 时, Wilson θ 法是无条件稳定的。以下是 Wilson θ 法的迭代方程:

$$\left\{\ddot{X}_{n+1}\right\}=\frac{6}{\theta^3 \Delta t^2}\left(\left\{X_{n+\theta}\right\}-\left\{X_n\right\}\right)-\frac{6}{\theta^2 \Delta t}\left\{\dot{X}_n\right\}+\left(1-\frac{3}{\theta}\right)\left\{\ddot{X}_n\right\} ;$$
$$\left\{\dot{X}_{n+1}\right\}=\left\{\dot{X}_n\right\}+\frac{\Delta t}{2}\left(\left\{\ddot{X}_{n+1}\right\}+\left\{\ddot{X}_n\right\}\right) ;$$
$$\left\{X_{n+1}\right\}=\left\{X_n\right\}+\Delta t\left\{\dot{X}_n\right\}+\frac{\Delta t^2}{6}\left(\left\{\ddot{X}_{n+1}\right\}+2\left\{\ddot{X}_n\right\}\right) .$$

2.3 仿真结果

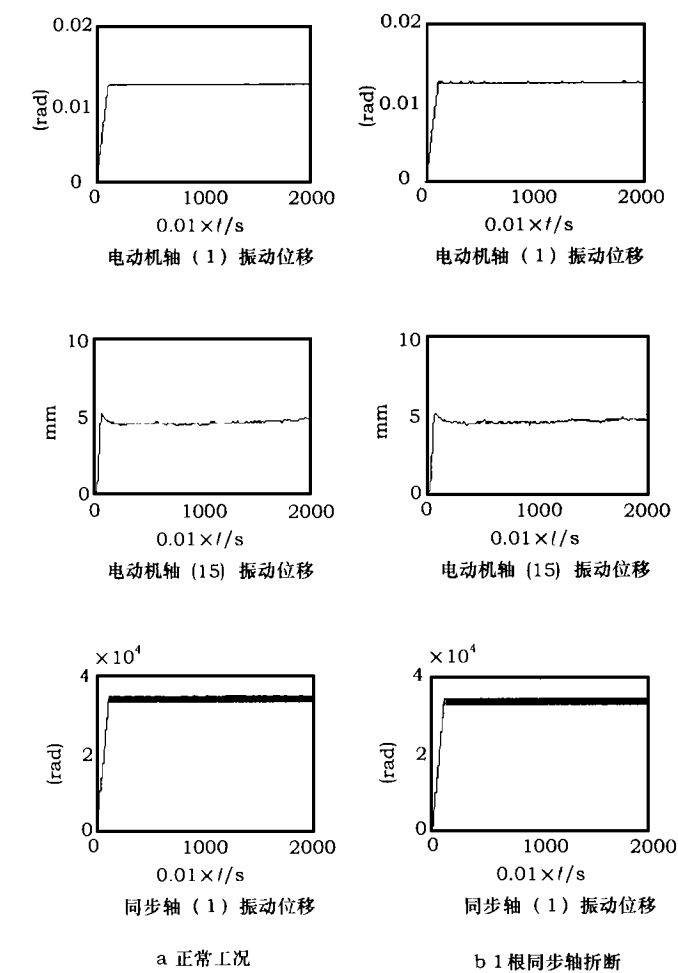


图 2 3 种工况仿真结果

表 1 部分自由度的输出响应

自由度		正常工况	一根同步轴断裂	两台电动机失效
最大振动位移	电动机轴(1)/rad	0.0125	0.0124	0.0124
	船厢(15)/mm	5.15	5.14	5.15
	纵向短同步轴(41)/rad	3.5×10^{-4}	3.6×10^{-4}	3.6×10^{-4}
最大振动速度	电动机轴(1)/(rad·s ⁻¹)	0.002	0.002	0.001
	船厢(15)/(m·s ⁻¹)	4.5×10^{-3}	4.4×10^{-3}	4.4×10^{-3}
	纵向短同步轴(41)/(rad·s ⁻¹)	3×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-4}
最大振动加速度	电动机轴(1)/(rad·s ⁻¹)	0.25	0.23	0.17
	船厢(15)/(m·s ⁻²)	0.25	0.22	0.26
	纵向短同步轴(41)/(rad·s ⁻²)	0.18	0.18	0.20

仿真输出大量图形,本文节选三个自由度进行分析,见图 2。

3 仿真结果分析

3.1 数据分析

正常工作时,系统各自由度的响应趋于平稳;同步轴断裂时,系统各自由度的响应与正常工况没有明显的变化;两台电动机失效时,系统各自由度的响应仍然趋于平稳。

3.2 部分自由度的输出响应

部分自由度的输出响应见表 1。

4 结论

两种故障工况与正常工况的输出响应没有大的差别。从理论上证明了在故障工况下,升船机系统能够安全、可靠地运行。

参考文献:

[1] 郭应龙. 机械动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[2] 师汉民, 谌刚, 吴雅. 机械振动系统分析·测试·建模·对策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.

[3] 张志涌, 刘瑞损, 扬祖樱. 掌握和精通 MATLAB [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.

[4] 廖道训, 梅华平. 全悬挂多点啮合柔性传动的动力学模型[J]. 华中理工大学学报, 1990, 18(增刊).

[5] 长江水利委员会. 三峡工程永久通

(下转第 29 页)

过程中, 残余应力得到松弛, 释放, 降到疲劳极限以下, 因此龟裂表层以下的残余应力应低于疲劳极限。再经过自然时效以及交变载荷下的微区塑变, 使残余应力得到缓解。另外再考虑转子锻件本身的残余压应力(约 50~60 MPa)会抵消一部分残余拉应力, 最后估算残余拉应力在 100 MPa 左右。

(2) 疲劳强度校核

残余应力为一静应力, 相当于平均应力 $\sigma_m = 100 \text{ MPa}$, 交变应力幅仍按原来弯曲正应力幅 $\sigma_a = 16.56 \text{ MPa}$, 疲劳极限也取事故后材料弱化的数值 $\sigma_{-1} = 197.57 \text{ MPa}$, 因为此时正应力为非对称循环

$$\begin{aligned} n_{\sigma} &= \frac{\sigma_{-1}}{\frac{\kappa_{\sigma}}{\epsilon_{\sigma}} \sigma_a + \psi_{\sigma} \sigma_m} \\ &= \frac{197.57}{\frac{1.6}{0.57 \times 0.85} \times 16.56 + 0.3 \times 100} = 2.3 \\ n_{\tau} &= 27.6 (\text{同前}) \\ n_{\sigma\tau} &= \frac{n_{\sigma} n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} = \frac{2.3 \times 27.6}{\sqrt{2.3^2 + 27.6^2}} = 2.29 > 2 \end{aligned}$$

其中 ψ_{σ} —— 应力不对称敏感系数, 对合金钢 $\psi_{\sigma} = 0.2 \sim 0.3$, 这里取 $\psi_{\sigma} = 0.3$, 其余系数同前。

(上接第 16 页) 航建筑物研究[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.

(上接第 19 页) 别, 均可获得良好的力学性能, 能满足衬板性能要求。

(3) 省略退火工序, 可节约大量燃料, 减少冒口切割次数, 减轻工人劳动强度, 缩短生产周期, 降低生产成本, 减少煤烟对环境污染, 有较好的经济效益和社会效益。

参考文献:

[1] 王桂珍, 罗元良, 陈利. 空淬马氏体钢衬板的研制[A]. 第

(上接第 26 页) 功率 —— $2 \times 104 \text{ KW}$; 转速 —— 540 r/min ; 减速机型号 —— ZLY315-14; 总速比 $i = 287.333$; 翻转转速 —— 1.88 r/min 。

4 结束语

由于双车翻车机这种大型重载设备目前国内应用数量较少, 所收集到的资料有限, 在经过市场调研和技术方案比较后, 选出上述方案进行设计。在

此时安全系数比常规计算的下降了很多, 但仍大于 2, 故为无限寿命。所以考虑残余应力以后, 即使平均应力增大, 应力幅仍不变, 最大应力幅 $\sigma_a = 27.35 \text{ MPa}$, 仍在图 2 曲线 2 以下, 故凹坑处仍维持无限寿命。

5 结论

某电厂 #3 机组发电机转子无论在正常工况或短路冲击下, 转子为无限疲劳寿命。事故发生后, 危险点最大应力 $\sigma_a = 27.35 \text{ MPa}$, 在疲劳极限以下, 故带缺陷后转子仍为无限疲劳寿命。当进一步考虑到转子缺陷表面产生的残余应力后, 其疲劳校核安全系数仍大于许用数值, 所以是安全的。该发电机转子至今仍继续正常运行。

参考文献:

[1] 徐灏. 疲劳强度设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
[2] 王仁智. 疲劳失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
[3] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.

(编辑: 王书平)

[6] 郑兆昌. 北京: 机械振动[M]. 机械工业出版社, 1986.

(编辑: 李建乐)

七届全国耐磨材料学术会议论文集[C]. 郑州: 《水利电力机械》编辑部, 1994. 155~156.

[2] 杨瑞林, 李力军, 吴志勇. 球磨机衬板用低合金耐磨钢的冲击磨料磨损耐磨性的研究[A]. 第四届全国耐磨材料学术会议论文集[C]. 郑州: 《水利电力机械》编辑部, 1988. 52~55.

[3] 朴东学, 齐笑冰, 李慧玉, 等. 多相抗磨材料及生产工艺的研究[A]. 第七届全国耐磨材料学术会议论文集[C]. 郑州: 《水利电力机械》编辑部, 1994. 9~13.

(编辑: 王书平)

力学性能的理论计算过程中, 对许多复杂的受力情况进行了适当的力学模型简化, 与实际运行情况可能存在出入, 所以对 1:10 的实物模型进行动态测试, 参照测试结果对设计进一步修正, 得出上述各参数。在结构设计上则借鉴了单车翻车机的许多优点。当然还需对实际运行情况进行测试, 来完善设备存在的不足。

(编辑: 李建乐)