

基于 ATA 的起重机械金属结构安全性评价研究^{*}

王 佳 杨金生

(天津市特种设备监督检验技术研究院,天津 300192)

摘 要: 采用事故树分析法(ATA),利用布尔代数法计算出事故树的最小割集、最小径集、及各基本事件的三种重要度。从中分析出影响起重机械金属结构安全运行的最主要因素,提出了相应的安全风险预防措施。对起重机械设计、制造、维护、检验具有指导意义,对起重机械设备安全预警,增加对危险源的控制能力,预防事故发生具有重要意义。

关键词: 起重机;金属结构;ATA;安全评价

中图分类号:TH215

文献标志码:A

文章编号:1007-4414(2013)01-0010-05

Safety assessment research of crane metal structure based on ATA

Wang Jia ,Yang Jin-sheng

(Tianjin special equipment inspection institute ,Tianjin 300192 ,China)

Abstract: In this paper ,the method of accident tree analysis (ATA) is adopted. By using the Boolean algebra method ,minimal cut sets ,the minimum path sets of the accident tree ,and three important degree of the basic events are calculated. The main factors of effecting crane metal structure safety operation are analyzed ,and the corresponding security risk prevention measures are put forward. It has guiding significance for the hoisting machinery designing ,manufacturing ,maintenance ,and inspection. And it has important sense for safety early warning ,increasing the hazard control ability ,preventing the accidents to happen.

Key words: crane; metal structure; ATA; safety assessment

1 前 言

众所周知,起重机械的安全性会随着其服役年龄的增长而有所降低,安全性的降低意味着起重机潜伏着各种不同的风险,而这些风险将是诱发起重机不同事故的直接原因。根据国家质量监督检验检疫总局的报告,2010年共发生特种设备事故296起,其中起重机械事故79起,占事故总数的27%。并且随着建筑业的兴盛,起重机械事故呈连年上升的趋势^[1]。



图1 塔吊大臂严重变形



图2 履带吊大臂折断

图1~3为不同类型的起重机械事故,事后调查表明起重机械绝大部分事故是由于金属结构失效引起的。因此,考察起重机械金属结构安全性已成为特种设备检验检测及企业安全生产的迫切需要。

2 研究目的及意义

起重机械金属结构之所以能够作为安全评价的重点,主要是因为:①起重机械金属结构安全评价能降低事故的发生。金属结构设计、加工和安装所占周期时间长且面临



图3 剪叉节变形开裂

来自设计方法、人员、承受载荷和制造材料的不确定性影响较多,如果某一环节出现差错,就会引发事故的发生;②起重机械金属结构是降低事故损失的客观需要。作为起重机械的主要载荷承受部分,对起重机械金属机构进行安全评价能有效的降低事故发生的可能性。对结构的安全评价,正是以整机的安全为主要目标,采用定性和定量方法,充分考虑影响结构的各项因素,帮助决策者建立相应的安全预警机制,达到预防事故发生的目的;③起重机械金属结构安全评价研究是特种设备行业进步的需要。安全评价被广泛的应用于各个领域,但起重机械金属结构方面的研

^{*} 收稿日期:2013-01-07

作者简介:王 佳(1982-),女,河北石家庄人,工程师,主要从事起重机械金属结构研究方面的工作。

究在国内起步较晚 ,尚处于早期阶段 ,因此如何将安全评价科学、合理的应用到起重机行业中将被重点研究 ,从而推进安全评价技术在起重机行业的全面发展^[2]。

采用事故树分析法对起重机械金属结构进行研究 ,寻找出影响起重机械金属结构安全的主要因素。该方法不仅可以分析出事故存在的直接原因 ,而且还能揭示出事故的潜在原因。并且可以直观、明了的描述事故发生的因果关系 ,还能定性、定量的进行进一步分析。起重机械种类繁多 ,工作条件繁重恶劣 ,载荷复杂多变 ,危险系数高 ,若能找出风险的主要因素并加以控制 ,即能有效减小事故发生的概率。

3 研究内容及路线

3.1 研究内容

(1) 搜集以往起重机械事故记录和资料 ,进行统计分析 ,计算该类事故发生的概率。

(2) 找出起重机械金属结构故障发生的部位和造成该故障的直接原因。

(3) 编制事故树 ,以其为基础 ,利用布尔代数法建立数学模型 ,通过最小割集、最小径集、三种重要度的计算求解 ,找出影响起重机械金属结构安全因素。

3.2 研究路线

本文的研究路线如图 4 所示。

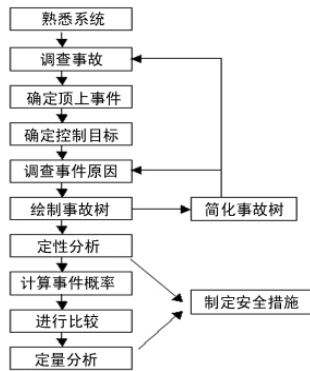


图 4 起重机械金属结构安全评价研究路线图

4 事故树的建立化简及计算

4.1 事故树的建造

事故树的建造方法如图 5 所示。

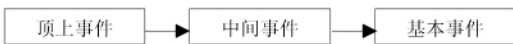


图 5 事故树的建造方法

顶上事件确立为起重机械的金属结构故障。中间事件为:强度失效 ,连接失效 ,刚度失效 ,稳定性失效破坏、腐蚀失效及造成这些事件的还可以继续向下分析的原因^[3]。表 1 为金属结构故障发生的部位和

造成该故障的中间事件。

表 1 金属结构故障发生的部位和造成该故障的中间事件

故障发生的部位	中间事件
主梁跨中 主梁腹板、盖板 跨端截面 端梁腹板	强度失效
主梁盖板和腹板的连接焊缝 主梁和端梁连接处焊缝 主端梁连接处的高强度螺栓 小车架主要受力焊缝 走台、栏杆主要受力焊缝 大、小车轨道松动	
主梁 主腹板 端梁 小车架 大、小车轨道	
主梁	
主梁外表面、内表面、联结件和传动件	稳定性失效(整体变形)
	刚度失效
	腐蚀失效

基本事件可从机械设备故障或损坏、人的差错、环境不良等方面考虑。通过搜集以往起重机械事故记录和资料 ,并进行统计分析 ,找出了基本事件 ,计算出该类事故发生的概率。表 2 为引起顶上事件及中间事件发生的各基本事件及其发生故障的概率。

表 2 各基本事件发生故障概率的估计

基本事件代号	基本事件名称	基本事件发生概率
X1	局部塑性变形	0.02
X2	起重量限制器失灵	0.06
X3	未设置起重量限制器	0.04
X4	吊运重物超重	0.1
X5	斜吊	0.05
X6	盲目作业	0.03
X7	无操作人员证	0.02
X8	材料质量、加工缺陷	0.01
X9	结构设计不当	0.02
X10	工作级别选用偏低	0.04
X11	设备管理不当	0.03
X12	焊接工艺缺陷	0.05
X13	安装时预紧力不足	0.01
X14	未定期检查	0.03
X15	主梁永久性下挠	0.02
X16	主梁挠度消失	0.01
X17	主梁动刚度失效	0.01
X18	未设置防护措施	0.06
X19	日常维护保养不及时	0.05
X20	腐蚀程度超过 10%	0.02

4.2 编制事故树

这是事故树分析法的最重要的部分。在确定顶上事件并找出造成顶上事件的各种原因后 ,从顶上事

件起进行演绎分析,逐渐分级找出所有直接原因事件,直到所要分析的深度,再用相应的事件符号和适当的逻辑门把它们从上到下分层连接起来,层层向下,直到最基本的原因事件,这就构成一个事故树^[4]。图6为起重机械金属结构故障所编制的事故树。

顶事件用T来表示,中间事件有21项,基本事件有20项。将整个事故树用数学方式表达为:

$$T = A + B + C + D + E = F + X_1 + G + H + I + X_1 + J + X_{17} + K \cdot X_{20} \\ = L + M + X_1 + N + K + S + X_1 + L + X_9 + X_1 \\ + X_{15} + X_{16} + X_{17} + (X_{18} + X_{19}) \cdot X_{20}$$

$$= (X_2 + X_3) \cdot X_4 \cdot (X_5 + X_6 + X_7) + (X_8 + X_9) \\ \cdot (X_{10} + X_{11}) + X_1 + X_8 + X_{12} + X_{18} + X_{19} + \\ X_{13} + X_{14} + X_1 + (X_2 + X_3) \cdot X_4 \cdot (X_5 + X_6 \\ + X_7) + X_9 + X_1 + X_{15} + X_{16} + X_{17} + (X_{18} + \\ X_{19}) \cdot X_{20} \quad (1)$$

在事故树编制完成之后,需要进行化简,特别在事故树的不同位置存在相同基本事件时,必须用布尔代数进行整理化简,化简后的表达式为:

$$T = X_1 + X_8 + X_9 + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + \\ X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{10}X_{11} + X_2X_4X_5 + X_2X_4X_6 + \\ X_2X_4X_7 + X_3X_4X_5 + X_3X_4X_6 + X_3X_4X_7 \quad (2)$$

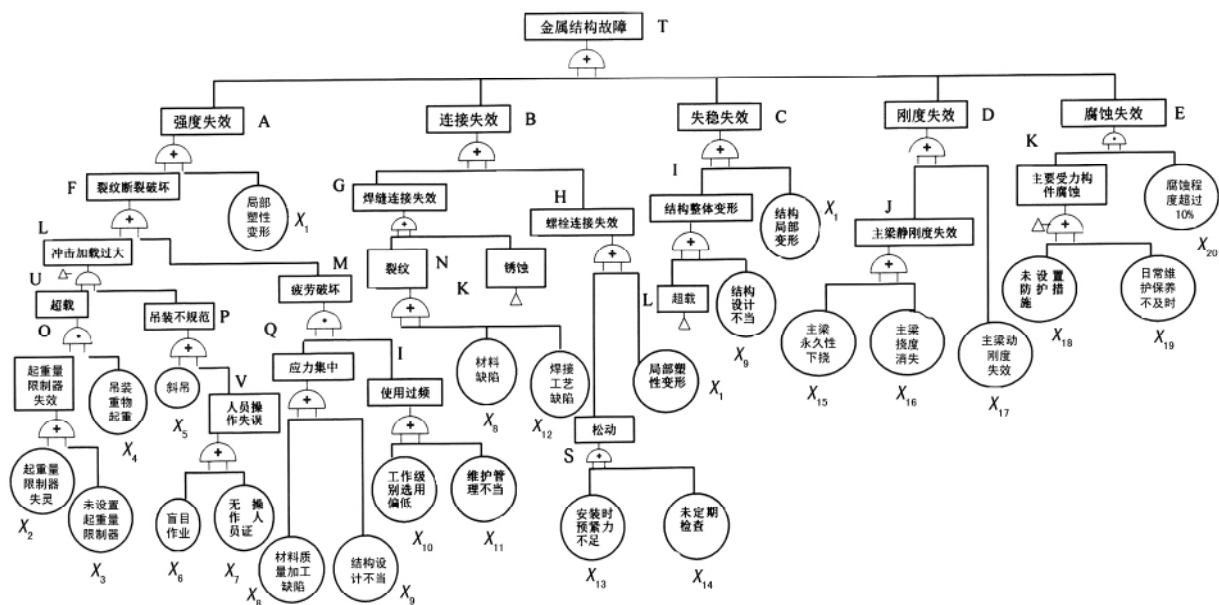


图6 起重机械金属结构故障事故树

4.3 事故树定性分析

4.3.1 计算最小割集

根据最小割集的求解原则,式(2)中每个逻辑积就是一个最小割集,由此可以得出起重机械金属结构事故的最小割集有18组: $\{X_1\}$, $\{X_8\}$, $\{X_9\}$, $\{X_{12}\}$, $\{X_{13}\}$, $\{X_{14}\}$, $\{X_{15}\}$, $\{X_{16}\}$, $\{X_{17}\}$, $\{X_{18}\}$, $\{X_{19}\}$, $\{X_{10}X_{11}\}$, $\{X_2X_4X_5\}$, $\{X_2X_4X_6\}$, $\{X_2X_4X_7\}$, $\{X_3X_4X_5\}$, $\{X_3X_4X_6\}$, $\{X_3X_4X_7\}$ 。

最小割集表明系统的危险性,每个最小割集都是顶上事件发生的一种可能渠道。最小割集的数目越多,系统越危险。求出事故树的全部最小割集,就可掌握事故发生的各种可能性,对掌握事故的规律,查明事故的原因大有帮助。根据最小割集,还可以发现系统中最薄弱的环节,直观判断出哪种情况最危险,哪些次之,以及如何采取预警措施。

4.3.2 计算最小径集

求最小径集是利用它与最小割集的对偶性,首先

作出与事故树对偶的成功树。求成功树的最小割集,就是原事故树的最小径集。

与事故树对偶的成功树的画法是原来事故树的“或”门换成“与”门,“与”门换成“或”门,各类事件发生换成不发生。然后,利用布尔代数化简法求成功树的最小割集。

$$T' = A' \cdot B' \cdot C' \cdot D' \cdot E' \\ = F' \cdot X_1' \cdot G' \cdot H' \cdot I' \cdot X_1' \cdot J' \cdot X_{17}' \cdot (K' + \\ X_{20}') \\ = L' \cdot M' \cdot X_1' \cdot N' \cdot K' \cdot S' \cdot X_1' \cdot L' \cdot X_9' \cdot X_1' \cdot \\ X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot (X_{18}' \cdot X_{19}' + X_{20}') \\ = (X_2' \cdot X_3' + X_4' + X_5' \cdot X_6' \cdot X_7') \cdot (X_8' \\ \cdot X_9' + X_{10}' \cdot X_{11}') \cdot X_1' \cdot X_8' \cdot X_{12}' \cdot X_{18}' \\ \cdot X_{19}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_1' \cdot (X_2' \cdot X_3' + X_4' + \\ X_5' \cdot X_6' \cdot X_7') \cdot X_9' \cdot X_1' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \\ \cdot (X_{18}' \cdot X_{19}' + X_{20}') \quad (3)$$

化简,得:

$$\begin{aligned}
T' &= X_1' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot \\
&\quad X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot (X_2' \cdot X_3' + X_4' + X_5' \cdot X_6' \\
&\quad \cdot X_7') \cdot (X_8' \cdot X_9' + X_{10}' \cdot X_{11}') \cdot (X_{18}' \cdot X_{19}' \\
&\quad + X_{20}') \\
&= X_1' \cdot X_4' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot \\
&\quad X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' + X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' \cdot X_8' \cdot \\
&\quad X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot \\
&\quad X_{18}' \cdot X_{19}' + X_1' \cdot X_4' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot \\
&\quad X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot X_{20}' + X_1' \cdot \\
&\quad X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot \\
&\quad X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' + X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' \cdot \\
&\quad X_8' \cdot X_9' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot \\
&\quad X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot X_{20}' + X_1' \cdot X_4' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}' \cdot \\
&\quad X_{11}' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot \\
&\quad X_{18}' \cdot X_{19}' + X_1' \cdot X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot \\
&\quad X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot \\
&\quad X_{20}' + X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}' \cdot X_{11}' \cdot \\
&\quad X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot \\
&\quad X_{19}' + X_1' \cdot X_4' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}' \cdot X_{11}' \cdot X_{12}' \cdot \\
&\quad X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot \\
&\quad X_{20}' + X_1' \cdot X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}' \cdot \\
&\quad X_{11}' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot \\
&\quad X_{19}' + X_1' \cdot X_2' \cdot X_3' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot X_{10}' \cdot X_{11}' \cdot \\
&\quad X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot X_{18}' \cdot \\
&\quad X_{19}' \cdot X_{20}' + X_1' \cdot X_5' \cdot X_6' \cdot X_7' \cdot X_8' \cdot X_9' \cdot \\
&\quad X_{10}' \cdot X_{11}' \cdot X_{12}' \cdot X_{13}' \cdot X_{14}' \cdot X_{15}' \cdot X_{16}' \cdot X_{17}' \cdot \\
&\quad X_{18}' \cdot X_{19}' \cdot X_{20}' \quad (4)
\end{aligned}$$

根据最小径集的求解原则,式(4)中的每一个逻辑和就是一个最小径集,式中含有 12 项逻辑和存在,因此就有 12 个最小径集。最小径集表示系统的安全性,求出最小径集就可知道预防起重机械金属结构发生故障的几种可能方案。

4.4 顶上事件发生的概率计算

(1) 采用首项近似法,计算顶上事件发生的概率。这种近似方法将顶上事件的发生概率近似等于所有最小割集发生概率的代数和,数学公式描述为:

$$g \approx \sum_{j=1}^k \prod_{x_i \in K_j} q_i$$

起重机械金属结构事故树有 18 个最小割集,20 个基本事件,若将其基本事件的概率依次设为: $q_1, q_2, \dots, q_{20}$, q_i 值见表 2。代入式上中,事故树顶上事件发生的概率可近似为:

$$\begin{aligned}
g &\approx q_1 + q_8 + q_9 + q_{12} + q_{13} + q_{14} + q_{15} + q_{16} + \\
&\quad q_{17} + q_{18} + q_{19} + q_{10}q_{11} + q_2q_4q_5 + q_2q_4q_6 + \\
&\quad q_2q_4q_7 + q_3q_4q_5 + q_3q_4q_6 + q_3q_4q_7 = 0.291
\end{aligned}$$

(2) 采用独立近似法,计算顶上事件发生的概

率。这种计算法的实质是: 尽管事故树各最小割集中彼此有共同事件,但均认为是无共同事件的,即认为个最小割集都是彼此独立的,数学表达式描述为:

$$g \approx \prod_{r=1}^k \prod_{X_i \in K_r} q_i = 1 - (1 - q_{k1})(1 - q_{k2})(1 - q_{k3}) \cdots (1 - q_{kn})$$

用独立近似算法计算起重机械金属结构事故树顶上事件发生的概率如下:

$$\begin{aligned}
g &\approx \prod_{r=1}^k \prod_{X_i \in K_r} q_i = 1 - (1 - q_{k1})(1 - q_{k2})(1 - q_{k3}) \cdots (1 - q_{kn}) \\
&= 1 - (1 - q_1)(1 - q_8)(1 - q_9)(1 - q_{12})(1 - q_{13}) \\
&\quad (1 - q_{14})(1 - q_{15})(1 - q_{16})(1 - q_{17})(1 - q_{18}) \\
&\quad (1 - q_{19})(1 - q_{10}q_{11})(1 - q_2q_4q_5)(1 - q_2q_4q_6) \\
&\quad (1 - q_2q_4q_7)(1 - q_3q_4q_5)(1 - q_3q_4q_6)(1 - q_3q_4q_7) \\
&= 0.257647799
\end{aligned}$$

4.5 基本事件的重要度分析

4.5.1 结构重要度

利用事故树的最小割集,由 $\sum I(i) = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_i-1}}$

得: $I(1) = I(8) = I(9) = I(12) = I(13) = I(14) = I(15) = I(16) = I(17) = I(18) = I(19) = 1$ 。

$$I(10) = I(11) = 1/2$$

$$I(4) = \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} = \frac{3}{16}$$

$$I(2) = I(3) = \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} = \frac{3}{32}$$

$$I(5) = I(6) = I(7) = \frac{1}{2^{6-1}} + \frac{1}{2^{6-1}} = \frac{1}{16}$$

所以,各基本事件结构重要度顺序为: $I(1) = I(8) = I(9) = I(12) = I(13) = I(14) = I(15) = I(16) = I(17) = I(18) = I(19) > I(10) = I(11) > I(4) > I(2) = I(3) > I(5) = I(6) = I(7)$ 。

4.5.2 概率重要度分析

结构重要度分析是从事故树结构上分析各基本事件的重要程度^[5]。如果进一步考虑各基本事件发生概率的变化会给顶上事件发生概率以多大影响,就要分析基本事件的概率重要度,其数学表达式为:

$$I_g(i) = \frac{\partial g}{\partial q_i}$$

利用该法可求出各基本事件的概率重要系数:

$$I_g(1) = \frac{\partial g}{\partial q_1} = 1; I_g(2) = \frac{\partial g}{\partial q_2} = q_4q_5 + q_4q_6 + q_4q_7$$

$$= 0.01; I_g(3) = \frac{\partial g}{\partial q_3} = q_4q_5 + q_4q_6 + q_4q_7 = 0.01; I_g(4) =$$

$$= \frac{\partial g}{\partial q_4} = q_2q_5 + q_2q_6 + q_2q_7 + q_3q_5 + q_3q_6 + q_3q_7 = 0.01;$$

$$\begin{aligned}
I_g(5) &= \frac{\partial g}{\partial q_5} = q_3 q_4 = 0.004; I_g(6) = \frac{\partial g}{\partial q_6} = q_3 q_4 = 0.004; \\
I_g(7) &= \frac{\partial g}{\partial q_7} = q_3 q_4 = 0.004; I_g(8) = \frac{\partial g}{\partial q_8} = 1; I_g(9) = \frac{\partial g}{\partial q_9} \\
&= 1; I_g(10) = \frac{\partial g}{\partial q_{10}} = q_{11} = 0.03; I_g(11) = \frac{\partial g}{\partial q_{11}} = q_{10} = \\
&0.04; I_g(12) = \frac{\partial g}{\partial q_{12}} = 1; I_g(13) = \frac{\partial g}{\partial q_{13}} = 1; I_g(14) = \\
&\frac{\partial g}{\partial q_{14}} = 1; I_g(15) = \frac{\partial g}{\partial q_{15}} = 1; I_g(16) = \frac{\partial g}{\partial q_{16}} = 1; I_g(17) \\
&= \frac{\partial g}{\partial q_{17}} = 1; I_g(18) = \frac{\partial g}{\partial q_{18}} = 1; I_g(19) = \frac{\partial g}{\partial q_{19}} = 1.
\end{aligned}$$

所以,各基本事件概率重要度顺序为: $I(1) = I(8) = I(9) = I(12) = I(13) = I(14) = I(15) = I(16) = I(17) = I(18) = I(19) > I(11) > I(10) > I(4) = I(2) = I(3) > I(5) = I(6) = I(7)$ 。

4.5.3 基本事件的关键(临界)重要度

当各基本事件发生概率不等时,一般情况下,改变概率大的基本事件比改变概率小的基本事件容易,但基本事件的概率重要度系数并未反映这一事实,因而它不能从本质上反映各基本事件在事故树中的重要程度^[6]。

其数学表达式描述为:

$$CI_g(i) = \frac{\partial \ln g}{\partial \ln q_i}$$

其与概率重要度系数的关系:

$$CI_g(i) = \frac{q_i}{g} I_g(i)$$

利用该方法可以求出各基本事件的临界重要度系数:

$$CI_g(1) = \frac{q_1}{g} I_g(1) = 0.06873;$$

$$CI_g(2) = \frac{q_2}{g} I_g(2) = 0.00206;$$

$$CI_g(3) = \frac{q_3}{g} I_g(3) = 0.00137;$$

$$CI_g(4) = \frac{q_4}{g} I_g(4) = 0.00344;$$

$$CI_g(5) = \frac{q_5}{g} I_g(5) = 0.00069;$$

$$CI_g(6) = \frac{q_6}{g} I_g(6) = 0.00041;$$

$$CI_g(7) = \frac{q_7}{g} I_g(7) = 0.00027;$$

$$CI_g(8) = \frac{q_8}{g} I_g(8) = 0.03436;$$

$$CI_g(9) = \frac{q_9}{g} I_g(9) = 0.06873;$$

$$CI_g(10) = \frac{q_{10}}{g} I_g(10) = 0.00412;$$

$$CI_g(11) = \frac{q_{11}}{g} I_g(11) = 0.00412;$$

$$CI_g(12) = \frac{q_{12}}{g} I_g(12) = 0.17182;$$

$$CI_g(13) = \frac{q_{13}}{g} I_g(13) = 0.03436;$$

$$CI_g(14) = \frac{q_{14}}{g} I_g(14) = 0.10309;$$

$$CI_g(15) = \frac{q_{15}}{g} I_g(15) = 0.06873;$$

$$CI_g(16) = \frac{q_{16}}{g} I_g(16) = 0.03436;$$

$$CI_g(17) = \frac{q_{17}}{g} I_g(17) = 0.03436;$$

$$CI_g(18) = \frac{q_{18}}{g} I_g(18) = 0.20619;$$

$$CI_g(19) = \frac{q_{19}}{g} I_g(19) = 0.01718$$

所以,各基本事件关键重要度顺序为: $I(18) > I(19) = I(12) > I(14) > I(15) = I(1) = I(9) > I(8) = I(13) = I(16) = I(17) > I(11) = I(10) > I(4) > I(2) > I(3) > I(5) > I(6) > I(7)$ 。

将3种基本事件重要度比较分析总结如下。

(1) 从结构重要度分析可知:基本事件 X1、X8、X9、X12、X14、X13、X15、X16、X17、X18、X19 对顶事件发生影响最大,基本事件 X10、X11、X4、X2、X3 影响次之,而基本事件 X5、X6、X7 影响最小。

(2) 从概率重要度分析可知:降低基本事件 X1、X8、X9、X12、X13、X14、X15、X16、X17、X18、X19 的发生概率,能迅速有效地降低顶事件的发生概率;其次依次是基本事件 X11、X10、X4、X2、X3;而最不重要、最不敏感的是基本事件 X5、X6、X7。

(3) 从关键重要度分析可知:基本事件 X18 敏感性强,而且本身发生概率较大,所以它的重要度最高;基本事件 X12、X19 敏感性较强,本身发生概率又大,所以它们的重要度也提高了;而基本事件 X5、X6、X7,虽然发生概率不小,但是敏感性较差,所以他们的影响依然最小。

5 事故树结论分析

(1) 从事故树的结构来看,导致金属结构故障的中间事件共有 21 个,基本原因事件有 20 个,这些因素独立作用或相互结合都可能导致事故发生,同时

(下转第 17 页)

从图 5 可以看出齿轮的模式分布主要为圆周振动和弯曲振动,第七阶模态到第十阶模态有较大的振动,齿轮发生了弯曲和扭转,这几阶模态的振型对齿轮的轮齿影响较大,在齿轮啮合时,会增大两个齿之间的摩擦和碰撞,造成齿轮的严重磨损。除此之外,相邻的两阶模态的振动频率很接近,因此振型也很相似,只是最大振型位移发生的齿的位置不一样。

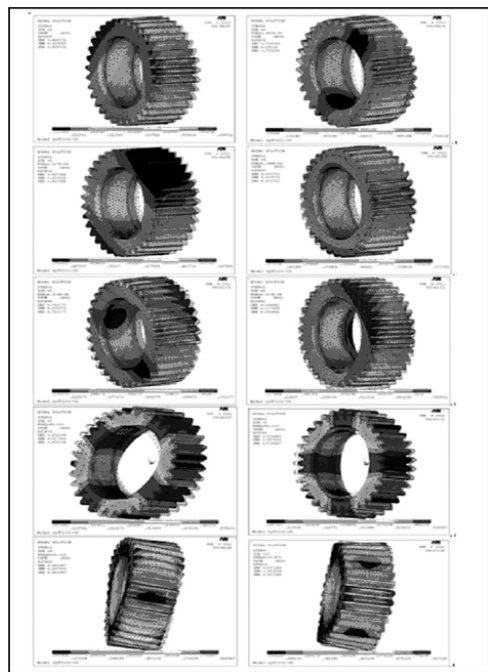


图 5 齿轮前十阶模态振型图

6 结 论

(1) 通过 Pro/E 建立渐开线圆柱齿轮的三维实体模型,为 ANSYS 进行分析提供了精确的模型,讨论了 Pro/E 和 ANSYS 之间的数据转换。

(2) 通过 ANSYS 有限元软件计算了齿轮的前十阶固有频率和振型,通过 ANSYS 后处理程序显示振型图,可以很直观的分析齿轮的模式振型。

(3) 在齿轮传动系统的设计中考虑齿轮固有频率和振型,即用同样的方法对太阳轮、内齿圈的模态进行求解,得出的结果和行星轮进行分析,以及改进设计,避免齿轮系统发生共振。

(4) 对齿轮的模式振型分析表明,圆周振动是齿轮发生共振可能性最大的振型。高阶的模式振动对振动影响较大,在齿轮传动设计中,应考虑齿轮的固有频率和振型,是外界激励相应的频率避开齿轮的固有频率,以防齿轮发生共振现象。

(5) 经分析优化后的截割减速箱,通过应用证明,完全达到了设计要求。

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 秦宇. ANSYS 基础与实例教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [3] 叶友东, 周哲波. 基于 ANSYS 直齿圆柱齿轮有限元模态分析[J]. 机械传动, 2006(5): 27-29.

(上接第 14 页)

由事故树也可以直观地看出各因素之间的相互联系。

(2) 事故树由 17 个“或门”和 4 个“与门”连接组成,说明在钢板开裂、焊缝连接、螺栓连接、钢板变形、钢板腐蚀五个环节,非常容易发生事故,存在严重的安全隐患。

(3) 事故树的最小割集共有 18 个,说明影响起重机金属结构安全的因素很广泛,排除起重机械金属结构的安全隐患应从最小割集着手。事故树的最小径集共有 12 个,其中项 X1, X8, X9, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19 这 11 个基本事件在每个最小径集均出现,表明它们是起重机金属结构安全防线的薄弱环节,安全评价的重点就应当围绕这 11 个基本事件进行展开。

(4) 在收集到足够数据之后,对基本事件进行概率统计,计算出顶上事件的发生概率和定量分析,得

到定量的结果。

参考文献:

- [1] 敬东. 我国特种设备安全评价分析[J]. 化工机械, 2010, 37(4): 510-511.
- [2] 董达善. 起重机械金属结构[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [3] 顾迪民. 起重机械事故分析和对策[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 黄海. 港口起重机械金属结构安全性评价方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [5] 刘峰, 叶义成, 黄勇. 系统安全评价方法的研究现状及发展前景[J]. 中国水运, 2007, 7(1): 179-181.
- [6] 杨瑞刚, 徐格宁, 范小宁. 桥式起重机结构可靠性失效准则与剩余寿命评估准则[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(10): 95-100.
- [7] GB/T3811—2008. 起重机设计规范[S].