

# 基于机械模糊可靠性理论的铝锭铸造传动系统的设计\*

邵芳<sup>1</sup>, 李法庆<sup>1</sup>, 李方义<sup>2</sup>

(1. 滨州职业学院 工业工程系, 山东 滨州 256624; 2. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**在对铝锭铸造传动系统进行失效分析并建立故障树的基础上,运用模糊故障树理论,对铸造传动系统进行了模糊可靠性分析;根据模糊数及逻辑门算子的运算规则,计算出了各中间事件及顶事件发生的概率,为提高系统的可靠性设计提供了依据。

**关键词:**铝锭铸造;传动系统;可靠性;模糊故障树

**中图分类号:**TP27 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2354(2007)02-0059-03

铝锭铸造机是生产普通重熔用铝锭的关键设备之一。实际生产中,铸造机输送链的非正常失效往往会导致传动系统运行不平稳、成型铝锭表面“水波纹”加剧等现象发生,严重时导致传动系统出现重大故障,给企业的生产组织带来一定的困难。文中基于机械模糊可靠性设计的基本理论,对铝锭铸造机传动系统进行分析与研究。

## 1 铝锭铸造机传动系统工作原理

铝锭铸造机基本结构为一台装载式链式输送机,其机械传动系统工作原理如图 1 所示。

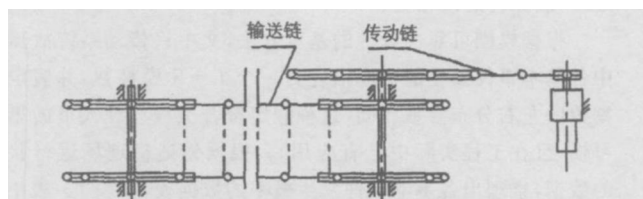


图 1 铝锭铸造机传动系统机构运动简图

铸模通过螺栓固连在两条平行的输送链条上,两条链以导轨为依托同步运行,将铸模以承托的方式进行连续输送,输送系统由带减速器的电机经过一级传动链驱动,配以其它机构的协调动作,铸造机便可实现铝锭的成型与冷却。

## 2 失效分析

### 2.1 结构

输送链为节距 265 mm 的长节距滚子输送链,结构如图 2 所示。外链板与销轴通过过盈配合与止锁件构成外链节,内链板与套筒通过过渡配合与扁面成型孔构成内链节,销轴插入套筒内构成内外链节的铰链副。单挂链链节数 162,总长 42 193 m。输送链正常工作时,水平移动平均速度为 3.53 m/min,由带减速器的电机通过一级传动比  $i = 4.6$  的传动链驱动,输送链工况条件恶劣,工作环境中存有大量的氧化铝粉尘和细小的铝渣,并伴有铸模冷却时产生的大量水蒸气;同时链条受铝液辐射热和铸模传热的作用,温度循环于 50 ~ 120 之间。

## 参考文献

- [1] Peter Barton. Tragfähigkeit von schraubrad- und schneckengetrieben der werkstoffpaarung stahl/ kunststoff [D]. Bochum. Dissertation Ruhr-Universitaet Bochum, 2000, 8.
- [2] Predki Wolfgang. Maschinenelemente 3. lehrstuhl für maschinenelemente, getriebe und kraftfahrzeuge [M]. Bochum. Ruhr-Universitaet Bochum, 1995.
- [3] Fischer Frank. Erstellung des programms SGen zum aufbau eines finite elemente modells in patran/ nastran zur untersuchung der hertz'schen pressung in einem schraubradgetriebe [D]. Bochum. Ruhr-Universitaet Bochum, 2001, 8.
- [4] 孙恒, 陈作模. 机械原理 (第 5 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.

**Research on the characteristics of engagement between plastic helical gear and steel worm based on COSMOS/ Works**

HAO Yi-shu, LI Lei

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The engagement characteristics between plastic helical gear and steel worm were expounded, and the model of involute tooth profile was established in order to realize high pair matching. Using the finite element method to simulate the stress and strain status and the deformation process of tooth profile of plastic helical gear under the environmental temperature of 100 and thus obtained the variation law of the engagement of plastic helical gear. By means of Hertz pressure theory the correctness was verified on carrying out finite element analysis based on COSMOS/ Works.

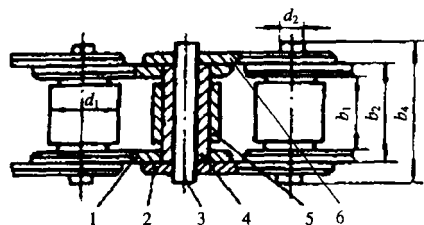
**Key words:** plastic helical gear; finite element analysis; model of tooth profile; deformation of tooth surface

Fig 6 Tab 2 Ref 4

“Jixie Sheji” 6313

\* 收稿日期: 2006-10-08; 修订日期: 2006-12-08

作者简介: 邵芳 (1972-), 女, 山东滨州人, 副教授, 在读博士, 主要从事机械制造及金属材料方面的研究。



1 止锁件;2 外链板;3 销轴;4 套筒;5 滚子;6 内链板

图 2 铝锭铸造机滚子链结构

## 2.2 失效形式分析

根据铝锭铸造机技术要求,输送链设计寿命为 1 a。而现场使用的输送链在连续运转不到 1 a 的时候就有约 70 % 的滚子在支撑导轨上停止转动,其后出现爬高甚至脱链现象,再继续运行,便产生剧烈振动,以至铝锭表面水波纹现象加剧而停车,从而彻底丧失工作能力。

铸造机输送链工作条件恶劣,正常工作中始终存在粉尘和水蒸气。在输送链结构中,滚子属最外层零件,因此工作时滚子与套筒之间的微小空间较多地受到粉尘的侵入,加上水蒸气的锈蚀作用,在套筒与滚子之间的间隙内将会产生一些杂质,这些杂质不断积累,使得套筒与滚子之间转动摩擦阻力矩增大,这种增大趋势将伴随锈蚀作用持续存在。当摩擦阻力矩增大到滚子与导轨之间的摩擦力不足以克服时,滚子便开始在导轨上滑动。滚子在导轨上的运动形式由滚动变为滑动,剧烈的磨损必然引起链节距的伸长,使得链条与链轮的啮合情况恶化,从而产生输送链爬高脱链现象。随着磨损的不断加剧,输送链各零件之间的间隙急剧增大,整体刚度下降。在相同频率与幅值的啮入冲击载荷作用下,输送链简谐振动的振幅必然增大,引起铝锭表面水波纹现象的加剧,无法正常生产而迫使铸造机停车。

## 3 铸造机传动系统可靠性模糊分析

### 3.1 故障树的建立

#### 3.1.1 顶事件的选择

选取不希望发生的事件为传动系统失效,为使问题简化,不考虑传动系统的维修性,认为系统故障与系统失效完全等价。铸造机传动系统在工作中出现的失效情况可归纳为 3 种故障模式:驱动装置失效;输送链系统失效;传动链系统失效。现按照铸造机传动系统的结构和特点,以“铸造机传动系统不能正常工作”为顶事件来建立故障树。如图 3 所示,共 21 个基本事件。

#### 3.1.2 边界条件及其它说明

(1) 铸造机传动系统实际为机电一体化系统,为使问题简化,不考虑电气控制系统对传动系统的影响,仅从机械传动的角度加以分析;(2) 在机械传动系统的分析中,由于多变形效应是链传动自身固有的特性,因此不考虑多变形效应引起的链条振动;(3) 铸造机实际应用情况表明,驱动装置及传动链系统的失效率较低,因此在失效原因分析中以输送链系统的失效原因为分析重点。

#### 3.1.3 故障树

根据确定的顶事件及边界条件,逐级分析传动系统发生故障的原因,由此建立传动系统故障树,如图 3 所示。

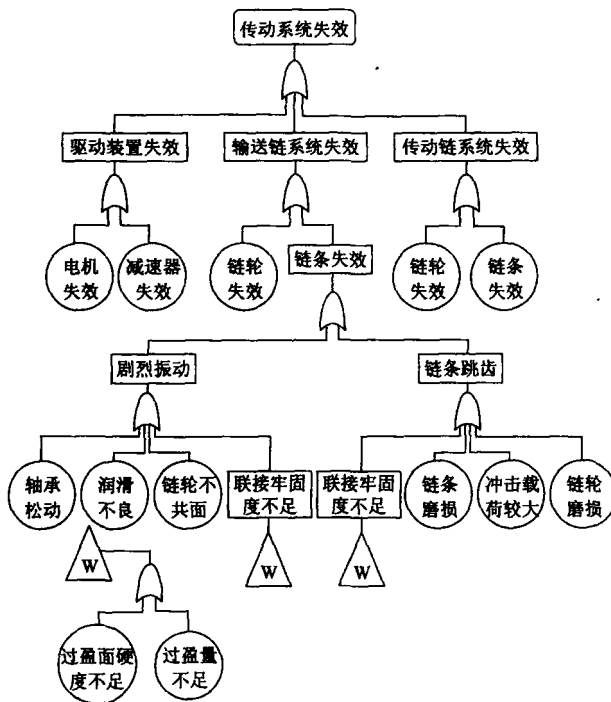


图 3 铸造机传动系统故障树

### 3.2 故障树的模糊分析

根据模糊可靠性设计的基本方法,文中将传动系统故障树中各基本事件发生的概率描述为一个  $L-R$  模糊数,并假定模糊数的左右分布参数相同(这种假定符合工程设计人员的思维习惯,且在工程实际中已有应用)。根据铸造机现场运行状况的数据,整理出各基本事件发生概率的数据表,如表 1。表中各基本事件用不同的字母表示。

表 1 基本事件数据表

符号	基本事件	均值 $m$	分布参数 $\alpha$
A	电机失效	0.001	0.000 2
B	减速器失效	0.001	0.000 2
C	传动链轮失效	0.005	0.003
D	传动链条失效	0.005	0.003
E	输送链轮失效	0.005	0.003
F	输送链系统轴承松动	0.01	0.002
G	输送链润滑不良	0.05	0.03
H	输送链轮不共面	0.005	0.002
I	输送链条磨损	0.01	0.002
J	输送链系统冲击载荷大	0.02	0.01
K	输送链轮磨损严重	0.005	0.002
L	输送链链节过盈联接面硬度不足	0.001	0.000 2
M	输送链链节过盈联接过盈量不足	0.01	0.002

在模糊可靠性故障树分析中引用模糊数  $P$  描述事件发生故障的概率,并用隶属度函数  $L_P \sim (x)$  来描述事件发生故障概率的模糊性。工程中可用三元组  $(m, \alpha, \beta)$  来表示模糊数,其中  $m$  对应隶属度为 1 的模糊数,也称为模糊均值,主要是根据工程人员的经验确定;和称数  $P$  的左、右分布,取值由所选用的隶属度函数  $L_P \sim (x)$  来决定,当和等于零时,  $P$  不是模糊数,是一确定的失效概率,和取值越大,模糊数  $P$  也就越模糊。可将它的模糊数  $P$  表示为:

$$P = (m - , m + )$$

式中:  $m - , m +$  ——分别为模糊数  $P$  的上限、下限。

当模糊数的取值在区间  $m - x m +$  时,隶属度为区间  $[0, 1]$  之间一值,且  $x$  越靠近均值  $m$ ,隶属度越大(当  $x = m$  时,隶属度为 1);当模糊数不在此区间时,隶属度值为 0。

根据工程技术人员的实践经验,可确定铝锭铸造传动系统各基本事件的模糊数据,如表 1 所示。由此可得顶事件的发生概率模糊数为:

$$P = [m - + , m + - ] = [m - ^* , m + ^* ]$$

当从 0 ~ 1, 间隔为 0.1 取值时,可得模糊数  $P$  在不同置信水平下的置信区间,如表 2 所示。由表 2 所提供的数据,相应地可作出模糊数  $P$  的隶属函数变化曲线,如图 4 所示。

表 2 不同置信水平下的置信区间

置信水平	模糊数均值 $m$	模糊数的左分布参数 *	模糊数的右分布参数 *	$P$ 的置信区间
0	0.009 84	0.004 10	0.004 1	$[0.005 70, 0.013 9]$
0.1	0.009 84	0.004 51	0.003 69	$[0.005 33, 0.013 53]$
0.2	0.009 84	0.004 92	0.003 28	$[0.004 92, 0.013 12]$
0.3	0.009 84	0.005 33	0.002 87	$[0.004 51, 0.012 71]$
0.4	0.009 84	0.005 74	0.002 46	$[0.004 10, 0.012 30]$
0.5	0.009 84	0.006 15	0.002 05	$[0.003 69, 0.011 89]$
0.6	0.009 84	0.006 56	0.001 64	$[0.003 28, 0.011 48]$
0.7	0.009 84	0.006 97	0.001 23	$[0.002 87, 0.011 07]$
0.8	0.009 84	0.007 38	0.000 82	$[0.002 46, 0.010 66]$
0.9	0.009 84	0.007 79	0.000 41	$[0.002 05, 0.010 25]$
1.0	0.009 84	0.008 20	0.000 00	$[0.001 64, 0.009 84]$

铸造机传动系统失效的概率为一模糊数,其隶属函数如图 4 所示。当给定阈值  $\lambda$  时,就可获得顶事件(传动系统失效)发生的可信区间。如果取  $\lambda = 0.8$ , 则顶事件发生的可信区间为  $[0.002 46, 0.010 66]$ , 即铸造机传动系统失效的可能性约为 2% ~ 10%, 这种可靠度指标是能满足工程需要的。

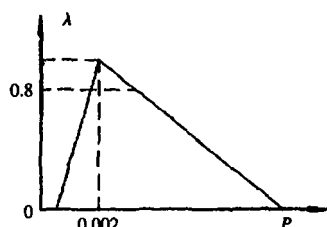


图 4 失效概率的隶属函数

上述结论在一定程度上可供工程设计参考,但在传动系统故障树模糊分析过程中,为使问题简化而没有考虑各种失效模式的相关性,因此分析结果与实际情况存在一定的误差。

## 4 结论

(1) 由于操作人员、试验数据和零件材料等多方面的原因,应用传统的故障树分析很难对铸造传动系统的可靠性水平作出一个确切的评价,在对其进行失效分析并建立故障树的基础上,根据产品用户和工程技术人员依据经验所提供的模糊信息,运用模糊故障树理论,对铸造传动系统进行了模糊可靠性

分析,求出了在不同置信水平下铸造传动系统发生故障的概率区间值,为铸造传动系统可靠性设计的可靠性增长提供了部分参考依据。

(2) 在机械模糊可靠性设计理论研究方面,对应力和强度均为随机变量或模糊随机变量时,考虑到零件从安全到失效存在中间过渡过程的模糊可靠性设计方法进行了研究,并得出一些结果。这些结果虽然基本建立了机械模糊可靠性设计的理论框架,但其工程应用性仍然不强,主要体现在实际应用过程中仍需大量的、复杂的数学计算。目前有些学者提出利用计算机通过数字仿真的方法解决这一问题,作者将以文中研究的结果为基础,逐步探索机械模糊可靠性数字仿真的理论和方法。

## 参考文献

- [1] 董玉革. 机械模糊可靠性设计[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [2] 陈举华. 机械结构模糊优化设计方法[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] 楼顺天. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——模糊系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [4] 王学永. 模糊可靠约束下的普通蜗杆传动多目标设计[J]. 工程设计学报,2003,10(1):44-45.
- [5] 高振斌. 直齿圆柱齿轮传动的模糊可靠性优化设计[J]. 机械与电子,2004(3):9-11.
- [6] 吴波. 有限寿命下机械材料的疲劳强度近似等效正态分布研究[J]. 机械设计,2004,21(3):41-42.
- [7] 李秀莲. GA 在摩擦力作用下变位斜齿轮传动模糊可靠优化中的应用[J]. 航空动力学报,2005(2):159-163.
- [8] 沈伟,徐辅仁. 齿间摩擦对齿轮轮齿表面疲劳强度的影响[J]. 机床与液压,2001,29(6):70-73.
- [9] 徐辅仁,沈伟. 齿间摩擦对齿根弯曲应力的影响[J]. 兵工学报,2001,22(4):520-523.

## Design of aluminum ingot foundry transmission system based on the theory of mechanical fuzzy reliability

SHAO Fang<sup>1</sup>, LI Fa-qing<sup>1</sup>, LI Fang-yi<sup>2</sup>

(1. Department of Industrial Engineering, Binzhou Vocational College, Binzhou 256624, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** On the basis of carrying out failure analysis of aluminum ingot transmission system and utilizing the theory of fuzzy failure tree, fuzzy reliability was carried out on the foundry transmission system. On the basis of operation rules of fuzzy number and of logic gate operator the probabilities of occurrence of middle events and top events were calculated, thus provided basis on enhancing the reliability design of system.

**Key words:** aluminum ingot foundry transmission system; reliability; fuzzy failure tree

Fig 4 Tab 2 Ref 9

"Jixie Sheji" 6701