

基于模糊故障树的电喷发动机怠速不稳分析研究^{*}许海华^{1,2}

(1.广东科学技术职业学院 机械与电子工程学院, 广东 珠海 519090;

2.珠海市先进装备制造与材料成型技术重点实验室, 广东 珠海 519090)

摘要:怠速不稳是电喷发动机工作时经常遇到的故障现象。文中运用模糊故障树法对发动机怠速不稳故障系统进行分析计算,建立了怠速不稳系统故障树及其最小割集;对该系统进行定性分析和定量分析,用三角形模糊数描述故障系统底事件的发生概率,进行系统模糊故障概率重要度分析,根据模糊概率重要度大小进行故障诊断与排除,有效提高故障诊断排除效率;以中间事件火花塞故障为例进行分析计算,结果表明火花塞间隙过小是火花塞故障的关键事件。

关键词:汽车;电喷发动机;怠速不稳;故障诊断;模糊故障树

中图分类号:U472.4

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)04-0009-04

发动机转速在稳定转速(怠速期望转速)附近上下波动的现象称为怠速不稳,此时发动机与车身振动都较明显。电喷发动机在怠速运转状态时经常会产生运转不稳现象。产生怠速不稳的主要原因是气缸内混合气燃烧气体作用力的变化使各缸输出功率不均衡,使活塞在气缸内往复直线运动所受的水平方向分力不相同,导致对发动机横向力矩不平衡,产生抖动。气缸内气体作用力变化的故障都会引起怠速不稳。发动机怠速不稳故障容易引起发动机排放超标、污染环境等问题。

在故障诊断中,基于知识的诊断方法具有良好的自学习优点,但专家系统知识不容易获取,造成该方法难以推广应用;基于解析模型的诊断方法是基于一致性的诊断和溯因诊断,仅为两种极端情形;基于信号处理的诊断方法故障原因与设备故障征兆存在一定的不确定关系,容易造成故障错判与漏判;故障树分析法是一种应用较广泛、对复杂系统的可靠性和安全性等进行预测的方法。在发动机怠速不稳故障诊断中采用故障树分析法,顶事件(怠速不稳)和底事件(发动机零部件故障)的发生存在很大的随机性和模糊性,即存在大量的模糊事件,适合运用更具灵活性和适应性的模糊故障树法进行分析。

1 模糊故障树诊断原理

1.1 故障树分析方法

故障树分析方法(FTA)是一种应用于复杂系

统安全性和可靠性分析的方法,也是目前国内外公认的系统可靠性分析的重要方法。它以系统最不希望发生的事件(顶事件)为分析目标,应用逻辑演绎研究顶事件发生的各种直接与间接原因。它用一定的符号代替事件,用适当逻辑门把顶事件、中间事件及底事件连接成一棵倒立的树状图形。该树状图形(故障树)表达了系统故障之间的内在联系,指出零部件故障与系统故障之间的逻辑关系。对故障树进行定性分析,可求出顶事件发生的最小割集,即系统最薄弱的环节;对故障树进行定量分析,可求出顶事件发生的概率及其他定量指标,如底事件结构和概率的重要度等。

采用故障树分析方法,顶事件发生就是机械系统出现故障即失效,记为 T ;组成系统的各部件或零件故障为底事件,记为 $e_i (i=1,2,\dots,n)$ 。传统故障树分析法中系统和组成部件仅考虑失效、正常两种状态,底事件的发生概率被作为精确值对待,即把底事件定义为:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } e_i \text{ 发生} \\ 0, & \text{当 } e_i \text{ 不发生} \end{cases} \quad (1)$$

顶事件状态用 φ 表示, φ 就是底事件 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的函数,记为:

$$\varphi = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

顶事件状态可表示为:

$$\varphi(X) = \begin{cases} 1, & \text{当 } T \text{ 发生} \\ 0, & \text{当 } T \text{ 不发生} \end{cases} \quad (3)$$

^{*} 基金项目:广东省高职教育专业领军人才培养对象项目(粤教高函[2015]62号);珠海市汽车整容工艺及装备技术公共实验室项目(PB20085019);广东省科技计划项目(2010B010700019)

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$; $\varphi(X)$ 为故障树的结构函数。

1.2 建立模糊故障树

正常怠速时,发动机转速在怠速稳定转速(即期望值) ± 10 r/min 之间抖动,基本能维持稳定。怠速不稳会造成发动机抖动,表现如下:一般不稳,以怠速期望值 ± 20 r/min 抖动;严重不稳,超过怠速期望值 ± 20 r/min 抖动或在怠速期望值的一侧剧烈抖动。分析其产生原因,主要是由于机械零件磨损、脏污、安装不正确或电控系统工作不正常,造成混合气燃烧不良,引起个别气缸输出功率变化,导致

各缸功率不平衡,带来转速不稳定而造成怠速不稳。因此,组成发动机的进气系统、燃料供给系统、点火系统、排气系统、发动机机械系统等出现故障都会影响发动机混合气的形成与燃烧,从而造成怠速不稳定,引起怠速不稳故障。

对于发动机怠速不稳故障,由于引起故障的各系统零部件相对独立,可把各系统部件作为子系统进行故障模式分析,确定中间事件,然后逐级向下建树。根据这种思路确定故障树顶事件为发动机怠速不稳,由此建立的系统故障树见图1,其中各事件的编码见表1。

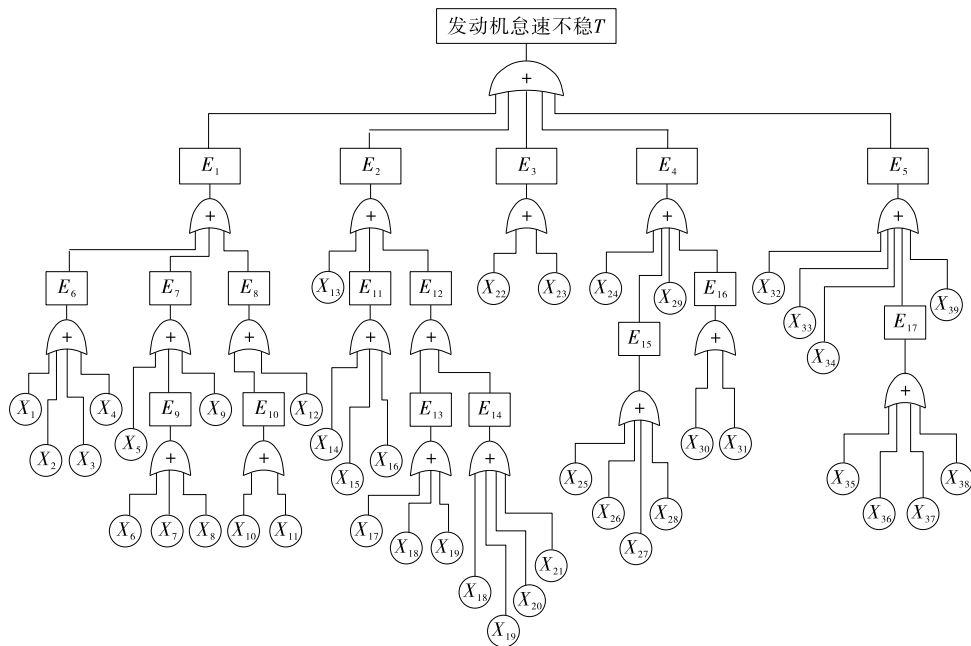


图1 发动机怠速不稳故障树

表1 发动机怠速不稳底事件的编码

编码	事件	编码	事件
T	发动机怠速不稳	E ₁₂	燃油压力异常
E ₁	进气系统故障	E ₁₃	燃油压力过高
E ₂	燃料供给系统故障	E ₁₄	燃油压力过低
E ₃	排气系统故障	E ₁₅	火花塞故障
E ₄	点火系统故障	E ₁₆	点火模块故障
E ₅	发动机机械故障	E ₁₇	活塞连杆故障
E ₆	未计量气体进入进气管	X ₁	进气管漏气
E ₇	进气计量不准确	X ₂	PCV 阀故障
E ₈	怠速进气量失准	X ₃	活性碳罐阀故障
E ₉	空气流量计信号不准	X ₄	怠速时 EGR 阀常开
E ₁₀	发动机转速、冷却液温度等信号不准	X ₅	节气门卡滞关闭不严
E ₁₁	喷油器堵塞	X ₆	空气流量计故障

续表 1

编码	事件	编码	事件
X_7	空气流量计传感器故障	X_{25}	火花塞间隙过大
X_8	空气流量计传感器线路故障	X_{26}	火花塞间隙过小
X_9	进气道脏污积垢多	X_{27}	火花塞击穿
X_{10}	节气门位置传感器故障	X_{28}	火花塞烧蚀
X_{11}	节气门位置传感器线路故障	X_{29}	点火提前角不准确
X_{14}	喷油嘴积碳	X_{30}	点火能量不足
X_{15}	燃油中杂质过多	X_{31}	点火模块不点火
X_{16}	燃油滤清器损坏	X_{32}	正时皮带安装错误
X_{17}	燃油泵故障	X_{33}	气门密封不严
X_{18}	油压调节器故障	X_{34}	凸轮磨损不一致
X_{19}	燃油系统传感器故障	X_{35}	活塞环端隙过大或断裂、环槽内
X_{20}	燃油管破损	X_{36}	积碳过多
X_{21}	燃油滤清器堵塞	X_{37}	活塞与气缸磨损过大
X_{22}	氧传感器故障	X_{38}	连杆弯曲
X_{23}	三元转化催化器堵塞	X_{39}	燃烧室积碳严重
X_{24}	高压线漏电		气缸垫损坏

分析引起发动机怠速不稳故障的原因,有些部件的失效是突发的,如火花塞击穿、高压线漏电等;也有些部件的磨损、漏油、漏气等是逐渐发生的退化失效,如喷油器滴漏、进气管漏气、活塞与气缸磨损过大等。分析部件失效,仅考虑突变的失效是不全面的。因此,在失效分析中,除那些完全失效的零部件外,应考虑未失效部件已形成的损失,把这种损失看成是一定程度上的失效。为此,运用模糊集合理论,将所有故障树节点模糊化,并给每一模糊事件定义隶属函数 $\mu_i: X \rightarrow [0, 1]$, 表示模糊事件 i 发生的程度,其中部件“完全失效”时的隶属度为 1, 部件“完好”(即不发生故障)时的隶属度为零,两者之间为一个连续变化的中间过渡过程。这种基于模糊事件的故障树称为模糊故障树。

1.3 模糊故障树的结构函数

分析发动机怠速不稳故障,系统的故障树数学表达式为:

$$\begin{aligned}
 T = & E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 = \\
 & (E_6 + E_7 + E_8) + (X_{13} + E_{11} + E_{12}) + \\
 & (X_{22} + X_{23}) + (X_{24} + E_{15} + X_{29} + E_{16}) + \\
 & (X_{32} + X_{33} + X_{34} + E_{17} + X_{39}) = X_1 + \\
 & X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + \\
 & X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + \\
 & X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + \\
 & X_{28} + X_{29} + X_{30} + X_{31} + X_{32} + X_{33} + \\
 & X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} + X_{38} + X_{39} \quad (4)
 \end{aligned}$$

1.4 模糊故障树分析方法

发动机怠速不稳故障原因中,有些零部件的失效是由功能退化造成的,因而考虑采用模糊数来描述零部件故障事件发生的概率。如假定系统中某一零件失效概率为 $0.025 \sim 0.035$, 很有可能为 0.028 左右,这是一个不明确的问题,也就是一个模糊问题,可用一个模糊数来描述。采用模糊数描述事件发生的概率,既能减少获取事件发生概率精确值的难度,又能结合工程技术人员的实际经验和判断构造模糊数的隶属函数,具有较大的灵活性和适应性。

在传统故障树分析中,顶事件的失效概率是利用逻辑门算子对基本事件发生概率进行运算获得的,知道底事件的发生概率和结构函数就可唯一地确定系统顶事件的发生概率。在模糊故障树分析中,采用模糊数描述底事件的发生概率,用模糊算子代替传统的逻辑门算子,从而得到顶事件发生的概率模糊数。用三角形模糊数表示底事件发生概率时,根据三角形模糊数截集表示方法,底事件发生概率的截集为:

$$F_{1\lambda} = [(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1 \lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1 \lambda] \quad (5)$$

$$F_{2\lambda} = [(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2 \lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2 \lambda] \quad (6)$$

$$F_{n\lambda} = [(m_n - \alpha_n) + \alpha_n\lambda, (m_n + \beta_n) - \beta_n\lambda] \quad (7)$$

故障树或门结构的模糊算子为:

$$F_{s\lambda}^{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i\lambda) =$$

$$\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i\lambda), \right.$$

$$\left. 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda) \right] \quad (8)$$

1.5 故障树定性和定量分析

通过最小割集法可求得发动机怠速不稳故障系统的最小割集为:

$$\{X_1\}, \{X_2\}, \dots, \{X_i\}, \dots, \{X_{39}\}$$

$$(i=1, 2, \dots, 39) \quad (9)$$

为分析简便,取一中间事件 E_{15} (火花塞故障) 进行分析,根据专家经验统计得到 E_{15} 失效概率为 12%。通过维修资料统计,火花塞故障中 18% 为火花塞间隙过大,34% 为火花塞间隙过小,16% 为火花塞被击穿,32% 为火花塞烧蚀。设 E_{15} 中底事件发生概率如表 2 所示,根据以上三角形模糊数的截集区间表示方法,有:

$$F_{25\lambda} = [(0.018 - 0.006) + 0.006\lambda,$$

$$(0.018 + 0.006) - 0.006\lambda] \quad (10)$$

$$F_{26\lambda} = [(0.034 - 0.012) + 0.012\lambda,$$

$$(0.034 + 0.012) - 0.012\lambda] \quad (11)$$

$$F_{27\lambda} = [(0.016 - 0.006) + 0.006\lambda,$$

$$(0.016 + 0.006) - 0.006\lambda] \quad (12)$$

$$F_{28\lambda} = [(0.032 - 0.012) + 0.012\lambda,$$

$$(0.032 + 0.012) - 0.012\lambda] \quad (13)$$

表 2 火花塞故障子事件发生概率

事件代号	事件名称	m	α	β
X_{25}	火花塞间隙过大	0.018	0.006	0.006
X_{26}	火花塞间隙过小	0.034	0.012	0.012
X_{27}	火花塞击穿	0.016	0.006	0.006
X_{28}	火花塞烧蚀	0.032	0.012	0.012

又因为 $E_{15} = X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28}$,结合式(8)及式(10)~(13),得到 E_{15} 发生概率的截集区间:

$$F_{E_{15}\lambda} = [0.064 + 0.036\lambda, 0.136 - 0.036\lambda]$$

$$(14)$$

当 $\lambda=1$ 时,底事件的发生概率为确定值, $F_{E_{15}1} = 0.1$;当 $\lambda=0$ 时,底事件的发生概率为一模糊数, $F_{E_{15}0} = [0.064, 0.136]$, $F_{E_{15}0}$ 最大为 0.136,最小为 0.064。

2 底事件模糊概率重要度分析

系统零部件的重要性不仅取决于其结构,还取决于其自身可靠度。根据有关文献,底事件的模糊概率重要度可表示为:

$$I_{h(j)} = \frac{\partial h(p)}{\partial p_j} \quad (15)$$

式中: $h(p) = h(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 为顶事件模糊故障函数; p_j 为第 j 个底事件 X_j 发生的模糊概率。

以三角形模糊数描述底事件发生概率为对象,分析该系统底事件的模糊概率重要度。该系统所建故障树全部由或门组成,因而:

$$\partial h(p) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i\lambda) =$$

$$\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i\lambda), \right.$$

$$\left. 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda) \right] \quad (16)$$

$$\partial p_j = [(m_j - \alpha_j) + \alpha_j\lambda, (m_j + \beta_j) - \beta_j\lambda]$$

$$(17)$$

$$I_{h(j)} = \frac{\partial h(p)}{\partial p_j} = \left[\prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i\lambda), \right.$$

$$\left. \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda) \right] \quad (18)$$

为简化分析,取一中间事件 E_{15} (火花塞故障) 进行分析,计算火花塞故障下底事件的模糊概率重要度,整个系统的底事件重要度计算方法与此类似。根据式(16)~(18)及表 2,取 $\lambda=0$,计算得: $I_h(25) = [0.867, 0.937]$; $I_h(26) = [0.896, 0.957]$; $I_h(27) = [0.869, 0.932]$; $I_h(28) = [0.875, 0.949]$ 。 E_{15} 底事件模糊概率重要度的排序为 $I_h(26) > I_h(28) > I_h(25) > I_h(27)$ 。

3 结语

该文采用模糊故障树法对发动机怠速不稳故障进行分析,建立了发动机怠速不稳系统的故障树,对该故障系统进行定量与定性分析,并应用三角形隶属函数对系统的可靠性进行了分析,同时对系统进行了模糊概率重要度分析。以事件 E_{15} (火花塞故障) 为例进行计算,结果表明火花塞间隙过小是火花塞故障事件的关键事件,这是由于气缸中混合气燃烧不充分,在火花塞两电极间产生积碳造成火花塞间隙过小。在发动机故障排除中,按照概率重要度

(下转第 15 页)

的原因有总电源线脱落、总保险丝熔断、继电器线圈或触点损坏、相关开关不能工作或搭铁不良。

故障诊断:首先检查发动机机舱内保险盒中保险丝是否熔断。若未熔断,将点火开关打到ON档,检查继电器与点火开关相连的接线处是否有12V电压。若电压为零,说明电源线路有故障;若电压为12V,则检查搭铁线是否正常。若搭铁线电压为零,则说明搭铁正常。然后检查继电器线圈和触点是否损坏,用万用表测量继电器85、86号端子的电阻,阻值应为几十欧,若阻值为零,说明继电器线圈断路;再给继电器85、86号端子12V电压,用万用表测量继电器30、87号端子的电阻。若阻值接近于零,说明继电器触点能正常闭合;若阻值为无穷大,说明触点出现故障,需更换继电器。

3.2 部分车窗不能正常升降

故障现象:左后车窗玻璃不能正常升降。

故障原因:分析图1所示电路,可能导致上述故障的原因有该车窗的控制开关故障、该车窗电机故障、连接导线有断路现象。

故障诊断:首先控制左后车窗主控开关(分控开关),观察车窗是否能正常工作。若主控开关(分控开关)能正常工作,则说明分控开关(主控开关)有故障;若主控开关和分控开关都不能正常工作,则检查车窗电机是否有故障。拆下电机进行通电,观察其是否能正常运转,若运转不正常,则更换电机;若运转正常,则说明连接导线有断路故障。

3.3 某个车窗只能向一个方向运动

故障现象:右后车窗只能上升,不能下降。

故障原因:分析图1所示电路,可能导致上述故

障的原因有该车窗的控制开关触点接触不良或玻璃升降器故障。

故障诊断:首先通过主控开关控制车窗升降,若主控开关工作正常,则说明分控开关触点有故障;若分控开关工作正常,则说明主控开关触点有故障;若主控开关和分控开关控制车窗升降时车窗都只向一个方向运动,则说明玻璃升降器有故障。

4 结语

该文通过介绍本田飞度汽车电动车窗的组成,分别对右后车窗和左前车窗控制电路进行了分析;结合电路,通过观察故障现象,找出导致故障的可能原因,然后采用排除法确定造成故障的具体原因,对确认的故障点进行维修。

参考文献:

- [1] 蓝芳芳.电动车窗常见故障诊断与排除[J].时代农机,2016(5).
- [2] 黄彩娟.基于电流回路原理的汽车电气设备故障诊断方法[J].汽车维修,2015(11).
- [3] 孙大鹏.浅析电动车窗常见故障诊断与排除[J].科技创新与应用,2013(19).
- [4] 曾凤清.汽车电动玻璃升降器的计算机辅助设计[J].客车技术与研究,2001(6).
- [5] 王乐平.客车车窗玻璃粘接工艺探讨[J].客车技术与研究,2007(6).
- [6] 郑志中.电动车窗玻璃控制系统的故障和检查[J].汽车电器,2009(4).

收稿日期:2016-12-26

(上接第12页)

进行检查分析,可极大地提高故障排除效率。

参考文献:

- [1] 马振东.电喷发动机怠速不稳故障的分析与排除[J].交通科技与经济,2007(4).
- [2] 韦皓,彭朝晖,刘存香.层次分析法在电控发动机怠速不稳故障诊断中的应用[J].小型内燃机与摩托车,2011,40(3).
- [3] 段隽喆,李华聪.基于故障树的故障诊断专家系统研究[J].科学技术与工程,2009,9(7).
- [4] 孙双,吕建新.基于故障树的变速器故障诊断系统研究[J].车辆与动力技术,2009(2).

- [5] 张杰,梁尚明,周荣亮,等.基于灰色关联的二齿差摆动活齿传动故障树分析[J].机械设计与制造,2012(6).
- [6] Hong-zhong Huang, Xin Tong, Ming J Zuo. Posbist fault tree analysis of coherent systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 84(2).
- [7] 施云.模糊故障树在汽车发动机故障诊断中的应用[J].桂林电子科技大学学报,2008,28(3).
- [8] 朱则刚.汽车电喷发动机控制系统的主要控制部件[J].客车技术与研究,2009(5).
- [9] 林树飞,李国璋,腾飞.模糊故障树在柴油机燃油系故障诊断中的应用[J].机械工程与自动化,2009,156(5).

收稿日期:2017-03-06