

航空发动机数字控制系统的可靠性

北京航空学院 王玉麟 姚志

摘要

本文从航空发动机数字控制系统可靠性设计的实际出发,针对一类不可维修的、非组合、非余度系统的马尔可夫模型,提出了一种新解法,即马尔可夫状态的概率分解法。与已有的马尔可夫信号流图法和马尔可夫模型的数值解法比较,它具有简单、物理概念清楚的特点,同时可获得所需的可靠度解析表达式,对系统可靠性设计能提供有用的信息。

一、引言

随着航空动力装置的发展,保证发动机可靠工作的自动控制系统也由简单的机械液压发展成为现在的电子-机械液压混合的多回路系统,它起着控制和监护的综合功能。

采用数控以后,由于电子元件存在固有的不可靠性,在设计发动机数控系统时,必须首先解决可靠性问题。解决可靠性的有效方法是采用余度控制,在制定余度控制方案时,必须计算系统的可靠度。由于发动机的控制系统工作在多状态下,用简单的串、并联模型的方法计算可靠度,显然是不行的,为此,提供可靠度计算的有效方法就成为重要的课题。

研究发动机数控系统的工作情况可知,系统中任一个部件失效,都会使系统处于表1所示五种基本状态之一,造成发动机推力的不同损失。影响系统工作的大小,取决于部件在系统中所处的地位,推力损失的大小取决于发动机的性能。

表1 基本状态对推力的影响

Table 1 Effect of basic states on thrust of the engine

状 态	完好状态	报警状态	性能下降	严重故障	失效转接
推力损失	0	2%	8%	20%	30%

当发动机数控系统满足以下条件:(1)元件的失效率服从负指数分布;(2)元件的失效是互相独立的;(3)在 Δt 内系统只作一次状态转移,则可把系统看成是一个时间连续、状态离散的马尔可夫过程^[2]。为此可得到图1的马尔可夫模型,或类似模型,这

1984年12月28日收到。

种模型又称马尔可夫状态转移图。

图 1 的上方标有五种基本状态, 其中完好状态是马尔可夫过程的起始状态, 失效转移是马氏过程的吸收状态, 其余是中间过渡状态。

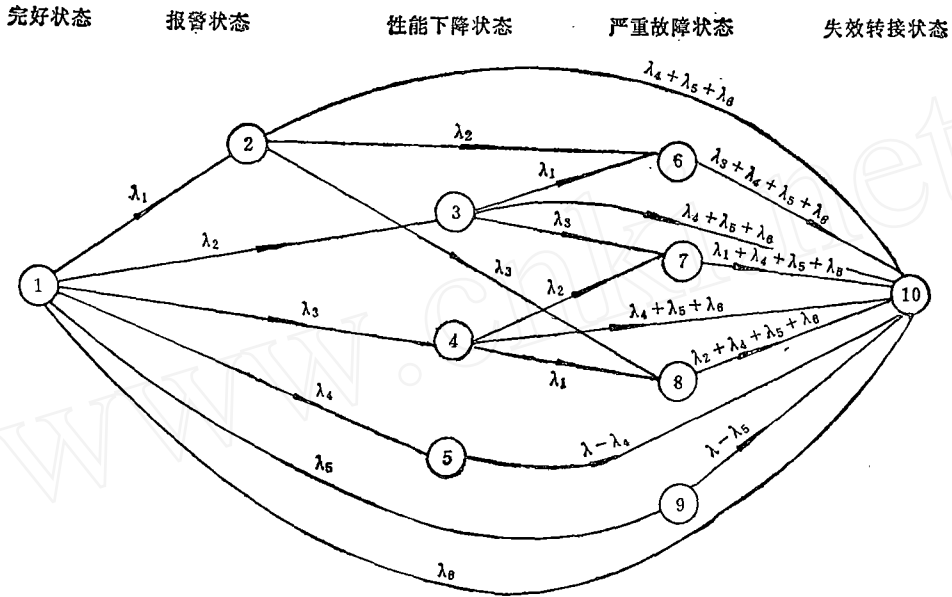


图 1 马尔可夫状态转移图

上述七种基本类型的状态点交织而成。为此把经失效分析后的马氏状态转移图按需要进行概率分解, 从而得到描绘马氏状态的概率分解图。

概率分解法, 除获得概率分解图外, 还把各个状态的概率和各个元部件的失效率有机的联系起来, 找出七种基本类型的状态点的概率公式, 从而计算各基本状态和整个系统的可靠度。

七种基本类型状态点的概率公式:

(1) 零级状态点

概率公式表征系统内各元部件均完好, 不存在状态转移, 从可靠性的意义考虑, 它的概率公式为

$$P_0 = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

其中 $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 是系统中 n 个元部件失效率总和。

(2) 一级状态点

对一级状态点, 它表示系统只有某一个元部件失效, 其余元部件均完好, 其概率公式

$$P_1 = e^{-(\lambda - \lambda_i)t} [1 - e^{-\lambda_i t}] = e^{-(\lambda - \lambda_i)t} - e^{-\lambda t} \tag{2}$$

之所以称为零级，是由于该点相对于起始状态没有任何状态的转移发生，如图 2 中的①点。

(2) 一级状态点

仅仅由于某个元件失效，使系统由起始完好状态转移到除末级状态以外的任何中间状态点，叫做相对于起始状态的一级状态点，如图 2 中的②点。

(3) 二级状态点

在一级状态点上，又有另一个元部件失效，形成转移的新中间状态点，叫做相对于起始状态的二级状态点。如图 2 中的③点。

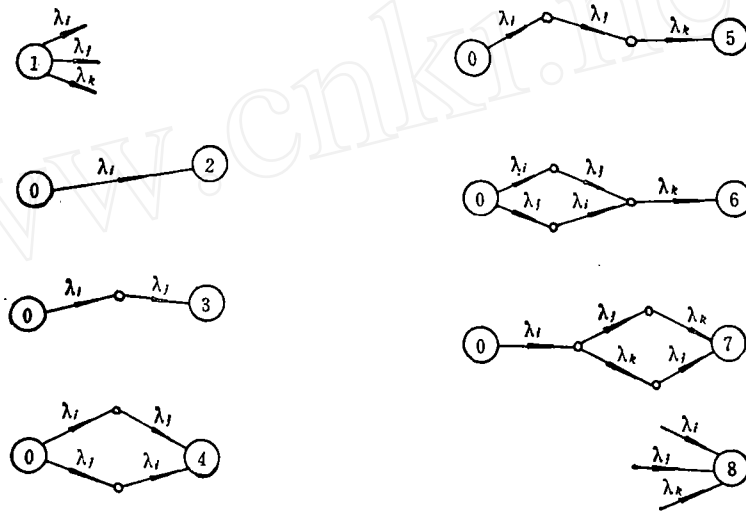


图 2 七种基本类型的状态点

Fig. 2 Seven basic types of state point

(4) 交叉二级状态点

分别在两个一级状态点的基础上，又有交叉对应的两个元部件失效而形成的新中间状态点，叫做相对于起始状态的交叉二级状态点。如图 2 中的④点。

(5) 三级状态点

在一级状态点的基础上，所形成的新二级状态点，或在二级状态点的基础上形成的新一级状态点，叫做相对于起始状态的三级状态点。如图 2 中的⑤点。

(6) 混合三级状态点

在一级状态点的基础上，所形成的新的交叉二级状态点，或在交叉二级状态点的基础上所形成的新一级状态点，都叫做相对于起始状态的混合三级状态点。如图 2 中的⑥、⑦点。

(7) 末级状态点

把马氏状态转移图中，只有内向传送失效率的点，即吸收状态点，叫做相对于起始状态的末级状态点。如图 2 中的⑧点。

在设计发动机数控系统时，首先考虑的是非组合、非冗余系统，在飞行中也属于不可维修的系统。对这一类系统的马氏状态转移图，无论其结构多么复杂，都不外乎是由

上述七种基本类型的状态点交织而成。为此把经失效分析后的马氏状态转移图按需要进行概率分解,从而得到描绘马氏状态的概率分解图。

概率分解法,除获得概率分解图外,还把各个状态的概率和各个元部件的失效率有机的联系起来,找出七种基本类型的状态点的概率公式,从而计算各基本状态和整个系统的可靠度。

七种基本类型状态点的概率公式:

(1) 零级状态点

概率公式表征系统内各元部件均完好,不存在状态转移,从可靠性的意义考虑,它的概率公式为

$$P_0 = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

其中 $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 是系统中 n 个元部件失效率总和。

(2) 一级状态点

对一级状态点,它表示系统只有某一个元部件失效,其余元部件均完好,其概率公式

$$P_1 = e^{-(\lambda - \lambda_i)t} [1 - e^{-\lambda_i t}] = e^{-(\lambda - \lambda_i)t} - e^{-\lambda t} \quad (2)$$

(3) 二级状态点和交叉二级状态点

这两种状态点的概率是一样的,它代表系统里两个元部件同时失效,其它元部件完好,其概率公式为

$$\begin{aligned} P_2 &= e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_j)t} [1 - e^{-\lambda_i t}] [1 - e^{-\lambda_j t}] \\ &= e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_j)t} - e^{-(\lambda - \lambda_i)t} - e^{-(\lambda - \lambda_j)t} + e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (3)$$

(4) 三级状态点和混合三级状态点

这两种状态的概率是相同的。它表明系统有三个部件同时失效,其余元部件均完好,其概率公式为

$$\begin{aligned} P_3 &= e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_j - \lambda_k)t} [1 - e^{-\lambda_i t}] [1 - e^{-\lambda_j t}] [1 - e^{-\lambda_k t}] \\ &= e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_j - \lambda_k)t} - e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_j)t} - e^{-(\lambda - \lambda_i - \lambda_k)t} - e^{-(\lambda - \lambda_j - \lambda_k)t} \\ &\quad + e^{-(\lambda - \lambda_i)t} + e^{-(\lambda - \lambda_j)t} + e^{-(\lambda - \lambda_k)t} - e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (4)$$

(5) 末级状态点

末级状态点的概率为

$$P_* = 1 - R \quad (5)$$

其中 R 为整个系统的可靠度。

有了(1)、(2)、(3)、(4)式,我们就可以根据马尔可夫状态的概率分解图,直接写出各状态点的状态概率。各基本状态点的概率相加即可得到整个系统的可靠度及其解析式。

三、具体应用

根据七种基本类型的状态点定义,对系统失效分析后,可画出的马氏状态转移图(图1)。按图上所标的五种基本状态,进行状态概率的分解,于是就得到相应的马氏状态

的概率分解图 (如图 3)。

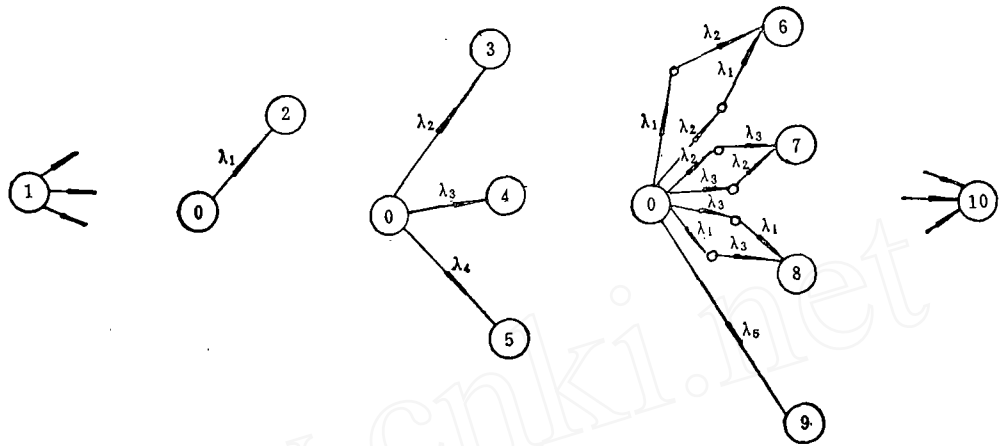


图 3 马尔可夫状态的概率分解图

Fig. 3 Markovian state probability resolving diagram

从分解图可知, 经过这样分解后, 很容易计算出所需系统在各种故障下的可靠度。其中完好状态, 由一个零级状态点①所构成。报警状态, 由一个一级状态点②构成。性能下降状态, 由三个一级状态点③、④、⑤所构成。严重故障状态, 由三个交叉二级状态点⑥、⑦、⑧和一个一级状态点⑨所构成。失效转接状态由一个末级状态点⑩所构成。图 3 中的⑩代表原马氏转移图 (图 1) 中的①点。根据图 3, 并利用 (1)、(2)、(3) 式直接写出各基本状态的可靠度如下:

$$R_{完好} = e^{-\lambda t} \quad \text{是零级状态;}$$

$$R_{报警} = e^{-(\lambda-\lambda_1)t} - e^{-\lambda t} \quad \text{是一级状态;}$$

$$R_{下降} = [e^{-(\lambda-\lambda_2)t} - e^{-\lambda t}] + [e^{-(\lambda-\lambda_3)t} - e^{-\lambda t}] + [e^{-(\lambda-\lambda_4)t} - e^{-\lambda t}] \text{是三个一级状态点相加;}$$

$$R_{故障} = [e^{-(\lambda-\lambda_1-\lambda_2)t} - e^{-(\lambda-\lambda_1)t} - e^{-(\lambda-\lambda_2)t} + e^{-\lambda t}] + [e^{-(\lambda-\lambda_2-\lambda_3)t} - e^{-(\lambda-\lambda_2)t} - e^{-(\lambda-\lambda_3)t} + e^{-\lambda t}] + [e^{-(\lambda-\lambda_1-\lambda_3)t} - e^{-(\lambda-\lambda_1)t} - e^{-(\lambda-\lambda_3)t} + e^{-\lambda t}] + [e^{-(\lambda-\lambda_6)t} - e^{-\lambda t}] \text{是三个交叉状态点和一个一级状态点相加。}$$

系统的总可靠度为

$$R = R_{完好} + R_{报警} + R_{下降} + R_{故障}$$

把上述关系式代入, 则

$$R = -e^{-\lambda t} - e^{-(\lambda-\lambda_1)t} - e^{-(\lambda-\lambda_2)t} - e^{-(\lambda-\lambda_3)t} + e^{-(\lambda-\lambda_4)t} + e^{-(\lambda-\lambda_5)t} + e^{-(\lambda-\lambda_1-\lambda_2)t} + e^{-(\lambda-\lambda_1-\lambda_3)t} + e^{-(\lambda-\lambda_2-\lambda_3)t}$$

式中 $\lambda = \sum_{i=1}^6 \lambda_i$

从计算过程可以看到, 在发动机数控系统中, 由于只考虑两个元部件同时失效的情况, 所以不用 (4) 式。本方法不受状态点多少的限制, 当状态点增多时, 只是增加概率的加法而已, 因此可根据系统实际情况划分计算单元, 只要有考虑工作环境后的失效率, 计算上不会遇到困难。利用本方法可以得到各基本状态和整个系统可靠度的解析表达式, 利用表达式可以编程计算。计算结果与马氏模型的数值解法计算结果完全相符^[9] (见

表 2)。

表 2 两种方法的比较

Table 2 Comparison between two methods

小时	“分解法”计算的可靠度	“数值解法”计算的可靠度	小时	“分解法”计算的可靠度	“数值解法”计算的可靠度
1.0	0.999510	0.999520	4.0	0.998078	0.998082
1.5	0.999283	0.999280	4.5	0.997843	0.997842
2.0	0.999045	0.999040	5.0	0.997597	0.997603
2.5	0.998805	0.998801	5.5	0.997360	0.997363
3.0	0.998555	0.998561	6.0	0.997128	0.999124
3.5	0.998324	0.998321	10.0	0.975212	0.995211

参 考 文 献

- [1] Rau, J. G., Optimization and Probability in System Engineering, Van Nostrand Reinhold Company, (1970).
- [2] Howard, R. A., Dynamic Programming and Markov Processes, John Wiley & Sons Inc., (1960).
- [3] Gokcek, O., Markov Analyses of Nuclear Plant Failure Dependencies, Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, (1979).
- [4] Pratt & Whitney Aircraft Group, Digital Electronic Control System Reliability, FR 13028, (1980) April.
- [5] (日)高木 昇主编, 市田 嵩著, 五所译, 可靠性技术——计设, 制造和使用 国防工业出版社 1980.6.
- [6] 刘炳章, 航空发动机数字控制系统可靠性, 北京航空学院硕士研究生论文, 1981年.

RELIABILITY OF AEROENGINE DIGITAL CONTROL SYSTEM

Wang Yulin and Yao Zhi

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

According to the practice of reliability design of aeroengine digital control system, a new method, probability Resolving Method of Markovian State, is provided to deal with the first kind Markovian model of non-maintainable, non-combinational and non-redundant system. A practical application of this method to reliability design and calculation is presented through an actual example. In comparison with Markovian signal flow chart method and numerical method in solving the Markovian model, the present method is quite simple and clear in physical concept, and easy to calculate not only manually but also on computer. The fact that the results obtained from these three methods are identical proves the correctness of the provided method.