



# 基于云模型的导航系统模糊 可靠性评测分析<sup>1)</sup>

张飞舟 范跃祖 孙先仿

(北京航空航天大学自动控制系 北京 100083)

(E-mail: zhangfeizhou@yahoo.com)

**摘要** 阐述基于云模型理论的飞行器导航系统模糊可靠性评测分析. 云模型是一种新的实现定性概念和定量数值之间转换的有力工具, 用来统一刻划基于语言值的定性概念和数值表示之间的相互映射关系. 云的数字特征期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  三个数值表征, 把模糊性和随机性完全集成在一起, 作为知识表示的基础. 将其用于飞行器导航系统模糊可靠性分析及故障检测, 可有效地提高飞行器导航系统的可靠性分析. 仿真结果说明了该分析方法的可行性和有效性.

**关键词** 人工智能, 模糊可靠性, 导航系统, 云模型

**中图分类号** TP202.1

## ASSESSMENT AND ANALYSIS OF FUZZY RELIABILITY BASED ON CLOUD MODELS IN AIRCRAFT NAVIGATION SYSTEM

ZHANG Fei-Zhou FAN Yue-Zu SUN Xian-Fang

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(E-mail: zhangfeizhou@yahoo.com)

**Abstract** Analysis of fuzzy reliability based on cloud models in aircraft navigation system is expatiated in this paper. A new mathematical representation of qualitative concepts is represented by cloud models. With the new models, mapping between qualities and quantities becomes much easier and interchangeable. They integrate fuzziness and randomness using digital characteristics, such as expected value  $Ex$ , entropy  $En$  and hyper entropy  $He$ . The fuzziness and randomness are not only complementary, but also inseparable. The application of cloud models to fuzzy reliability analysis and fault detection in aircraft navigation system can effectively enhance reliability assessment of navigation system. The simulation results demonstrate that the method has certain validity and feasibility.

**Key words** Artificial intelligent, fuzzy reliability, navigation system, cloud models

1) 国家“863”高技术计划(863-306-ZT04-03-4)和国防科技预研基金(J9.3.5)资助.

# 1 引言

导航系统与一般控制系统相比,有其自身的特点.系统性能的好坏,不仅直接影响飞行器的导航定位精度,而且也影响其控制性能以及机载武器系统的攻击性能.一旦系统发生故障,可能会造成严重后果,因此必须提高系统的可靠性.那么如何有效地分析导航系统的可靠性,如何对系统的完成规定功能的能力进行度量和评测,一般利用简单的二值进行判断并非十分有效.近年来许多研究者采用模糊可靠性方法进行系统分析,其分析方法和应用效果详见文献[1~3].本文将采用云模型理论对导航系统进行模糊可靠性评测分析.

# 2 云模型

## 2.1 云的定义

设  $U$  是一个普通集合,  $U = \{u\}$ , 称为论域. 关于论域  $U$  中的模糊集合  $\tilde{A}$ , 是指对于任意元素  $u$  都存在一个有稳定倾向的随机数  $\mu_{\tilde{A}}(u)$ , 称为  $u$  对  $\tilde{A}$  隶属度. 如果论域中元素是简单有序的, 则  $U$  可以看作是基础变量, 隶属度在  $U$  上的分布, 称为(隶属)云; 如果论域中的元素不是简单有序的, 而根据某个法则  $f$ , 可将  $U$  映射到另一个有序的论域上  $U'$ ,  $U'$  中的一个且只有一个  $u'$  与  $u$  对应, 则  $U'$  为基础变量, 隶属度在  $U'$  上的分布称为(隶属)云<sup>[4,5]</sup>.

## 2.2 云的数字特征

云用期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  三个数字特征值来表征, 它将模糊性和随机性完全集成到一起, 构成定性和定量相互的映射, 作为知识表示的基础, 如图 1 所示<sup>[5]</sup>.

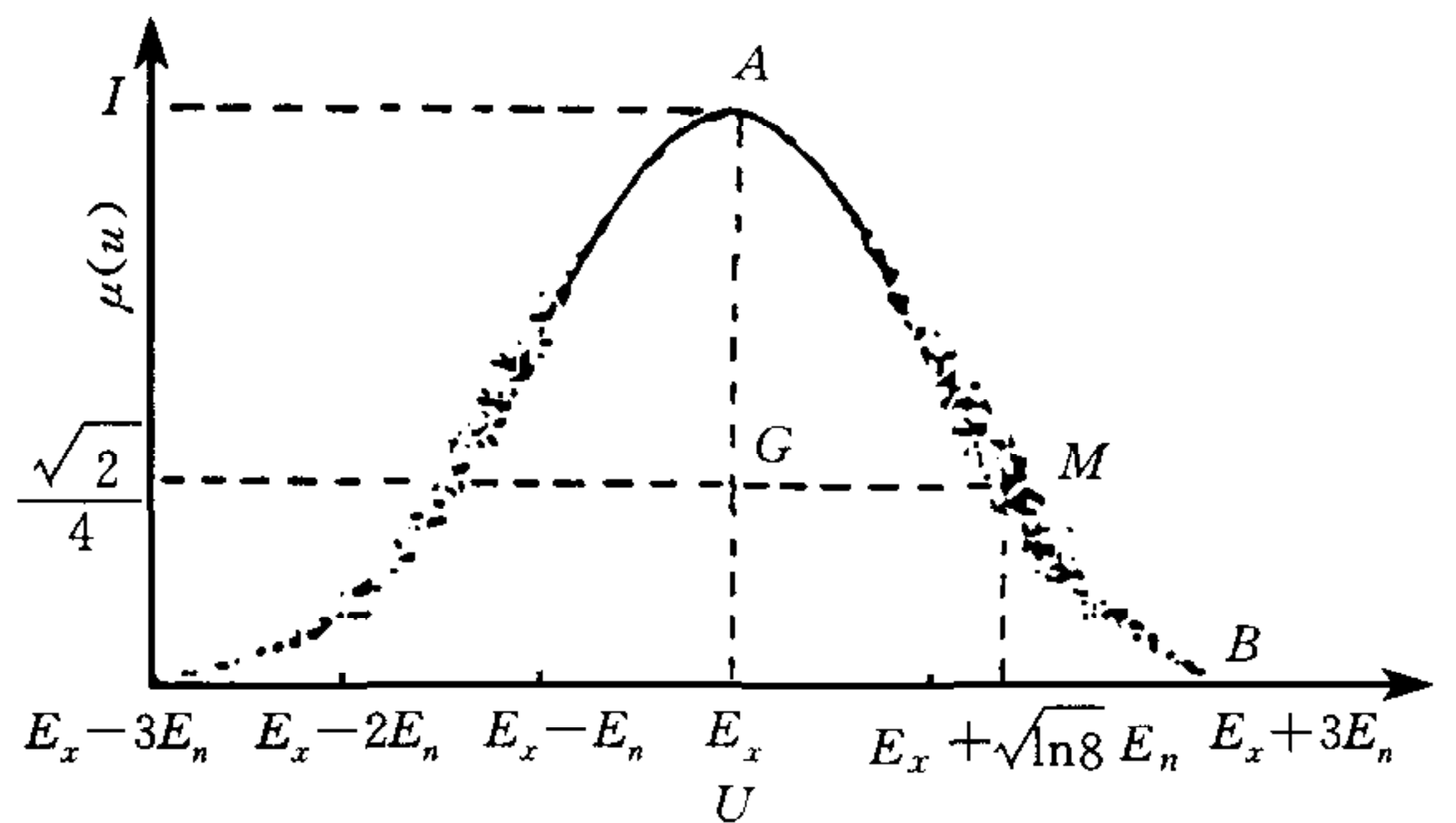


图 1 云及其数字特征

# 3 云发生器

云发生器(Cloud Generators——CG)有正向、逆向两种.

## 3.1 正向云

正向云发生器是根据已知正态云的数字特征  $Ex, En, He$ , 即  $CG \sim N^3(Ex, En, He)$ , 产生满足上述正态云分布规律的二维云  $Drop(x, \mu)$ , 称为云滴. 正向云通过输入三个数字特征形成合乎条件的云滴, 云发生器生成的成千上万的云滴构成整个云, 从而将一个定性概念通过不确定性转换云模型定量地表示出来. 当给定三个数字特征和特定的  $x = \mu_0$ , 产生满足上述条件的云滴  $Drop(\mu_0, y_i)$  的组合为  $X$  条件云. 当给定三个数字特征和特定  $y = \mu_0$  时, 产生满足上述条件的云滴  $Drop(x_0, \mu_0)$  的组合为  $Y$  条件云.

## 3.2 逆向云

逆向云发生器是已知云中相当数量的云滴分布  $Drop(x, \mu)$ , 确定正态云的三个数字特



征. 即给定符合某一正态云分布规律的一组云滴作为样本, 产生描述云所对应的定性知识的三个数字特征值  $Ex, En, He$ . 当云滴数有限时, 必然存在一定的误差, 随着云滴数目的增多, 误差将渐小. 已知两个云团的云滴数据, 以此还原出“基云”的三个数字特征:  $Ex, En, He$ <sup>[6]</sup>.

## 4 模糊可靠性

众所周知, 传统的可靠性问题的定量计算已十分成熟, 有一套完整的理论. 可靠性的含义就是系统在规定条件下、规定时间内完成规定功能的能力, 其主要指标是平均无故障间隔时间(MTBF). 模糊可靠性并不改变可靠性的定义, 而是对该定义中涉及的对象、条件、时间、功能和能力等的界定进行了拓宽. 现作如下假定: 1) 系统是可重组的, 即结构可变的; 2) 规定的环境条件和系统适应时间是明确的; 3) 规定的功能是通过性能指标反映的可量化计算并可实际测量; 4) 完成规定功能的能力评判不是简单二值的而是有程度的, 这种程度可以用语言值来描述<sup>[7]</sup>.

由于导航系统一般结构复杂, 系统中或大或小的单元故障时有发生. 很难简单地讲这种系统不是正常就是失效, 整个系统绝对正常的平均无故障时间几乎失去意义. 因此更加关注的是系统能在多大程度上保持其规定功能的能力. 比如系统无任何故障、系统有故障、系统已达到临界功能. 总之, 用语言值来表达“系统能在多大程度上保持其规定功能的能力”还有更多种说法. 由于实际系统的复杂性, 这种模糊语言值方法常常比精确值方法甚至更确切、更本质、更有效. 现以导航系统的主要功能来加以分析.

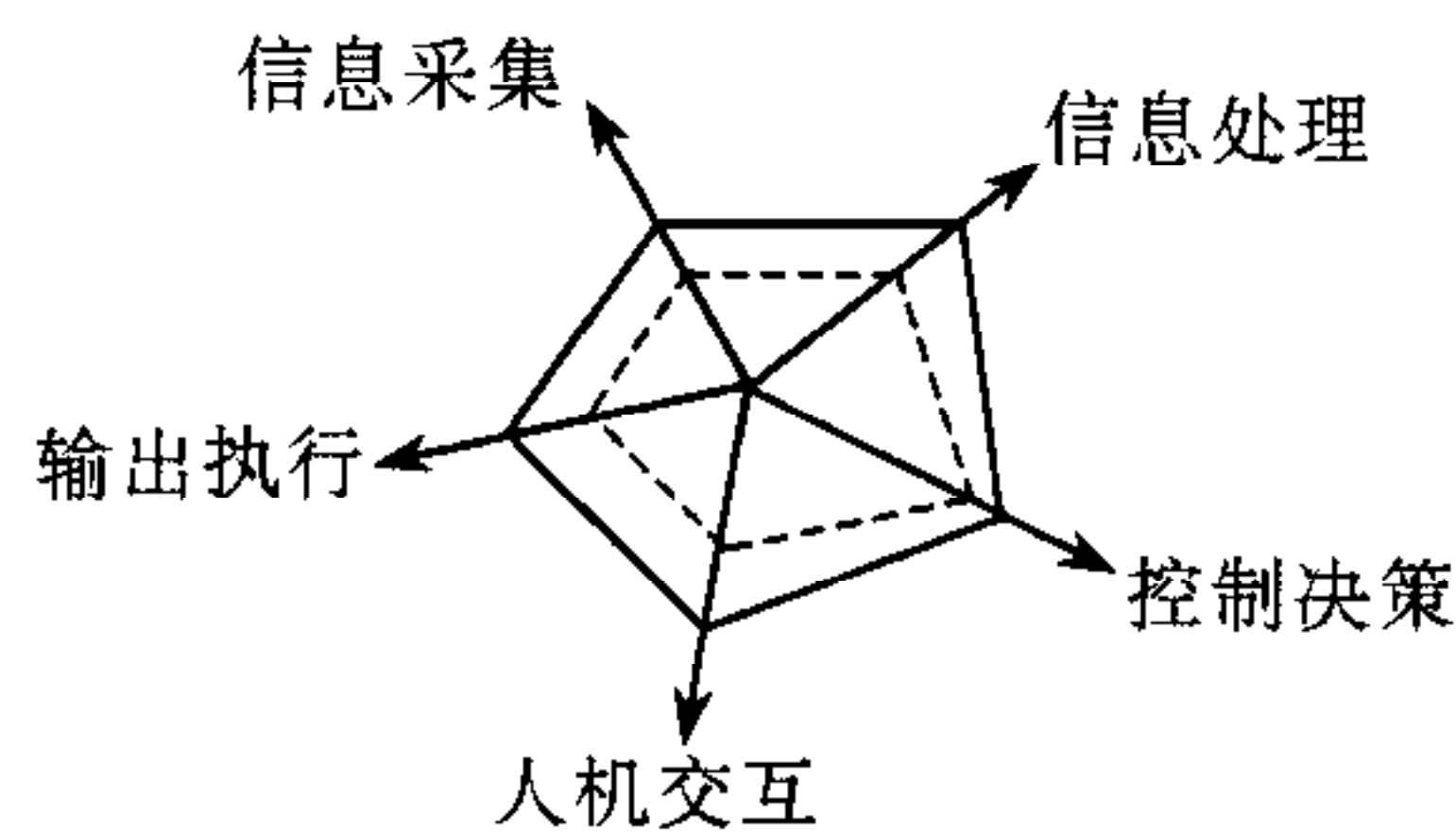


图 2 综合指标能力示意图

飞行器导航系统主要功能一般可分为: 信息采集、信息处理、控制决策、人机交互以及执行输出等五方面功能. 若这些指标可实际测量并能进行量化计算, 且对全部系统的贡献可以进行归一化处理, 即用相对指标值来表示, 这样就可得到一个指标综合能力图, 如图 2 所示<sup>[7]</sup>. 首先作一圆, 然后将圆周等分, 得到五个点. 做圆心分别与五个点的连线, 得到五个辐射状的半径, 分别表示导航系统的五项功能的额定指标值, 用对应的

五边形的面积  $H_0$  表征系统的综合额定能力, 每一次对导航系统功能的实际测量值构成一个五边形. 多边形的面积  $H$ , 即为导航系统完成的规定功能能力的一次次度量. 当系统的各项指标都达到其额定值时, 多边形的重心对应系统的原点. 当系统功能减弱时, 不但多边形的面积减小, 各项功能指标可能不协调, 出现瓶颈问题, 重心也将发生偏移, 重心和原点的距离——偏心距  $\lambda$  (阈值), 也反映系统的整体质量. 因此可用  $kH/\lambda H_0$  来度量全系统的综合能力, 其中  $k$  为比例因子.

问题的关键是如何理解“主要功能、基本功能、最低功能”这些语言值所表达的完成规定功能的能力在这个多边形中的所占面积的份量. 当然保持系统功能的程度等级数可以是明确的, 也可以是模糊的, 可以是多值的, 也可以是无限的, 这就需要一种对系统可靠性的具体度量和运算方法.



## 5 可靠性评测

通过上述云模型理论,以云为基础能够较好地构造描述导航系统可靠性评估用到的各种语言值.因此采用正向云进行导航系统模糊可靠性评判,采用逆向云进行导航系统中的测量组件的故障检测分析.假设基础变量以导航系统的五维综合能力图的面积  $H$  和额定值面积  $H_0$  的比值表示.为了简明起见,语言值“保持基本功能”,“保持主要功能”,“保持几乎全部功能”等,此处仅给出所对应云的期望曲线,如图 3 所示<sup>[7]</sup>.

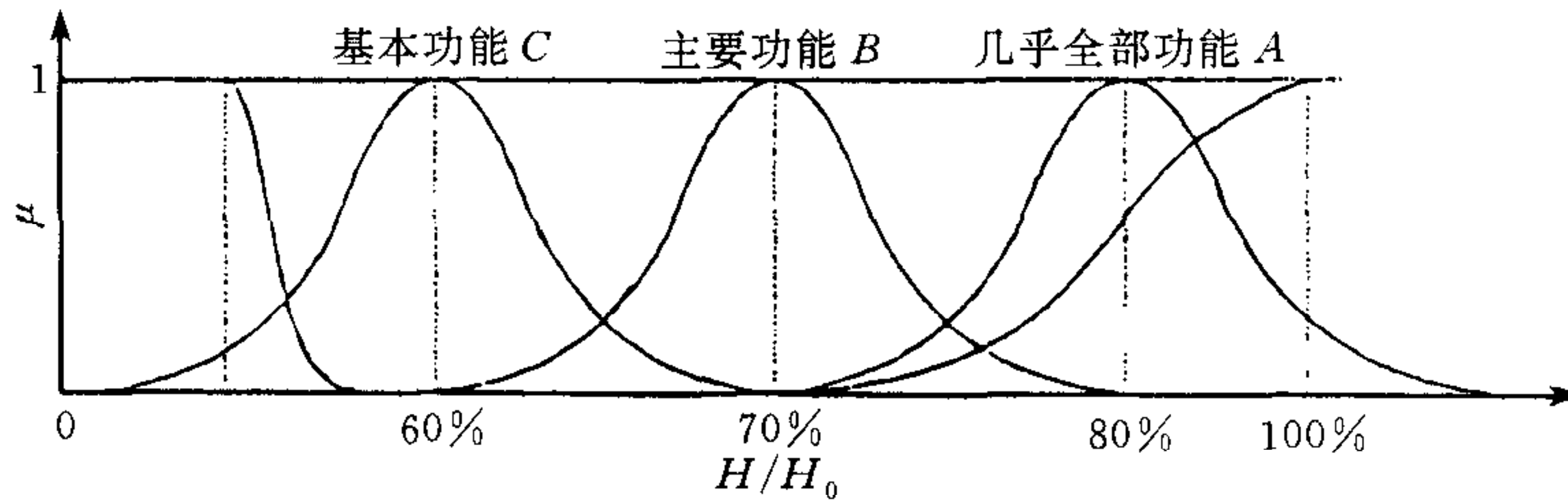


图 3 基于云模型语言值的评测示意图

根据  $Ex, En$  两个数字特征值,确定具有正态分布形式的云期望曲线方程

$$\mu(u) = \exp[-(u - Ex)^2 / 2(En)^2].$$

通过检测导航系统的某个特征量  $X$ ,它所产生的云期望曲线的宽度大于  $3En$ ,且  $\mu(Ex) = 1$ ,  $\mu(Ex \pm 3En) \approx 0$ ,就出现故障报警;如果期望曲线宽度小于  $3En$ ,且  $\mu(Ex) = 1$ ,  $\mu(Ex \pm 3En) \approx 0$ 无故障.

## 6 仿真实验分析

飞行器导航系统实际可靠性测试分析,不仅人力物力耗费极大,而且验证所需周期也较长.因此,运用基于云模型理论进行半实物仿真方法,可以有效地监测分析导航系统的可靠性.通过导航系统半实物仿真系统,可对不同的惯性组件进

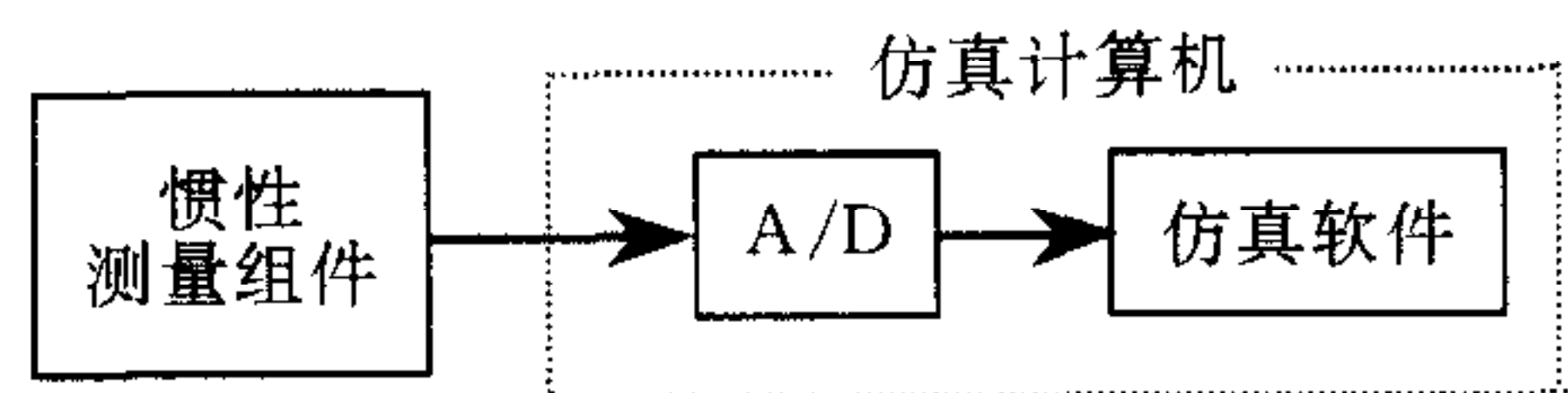


图 4 半实物仿真系统框图

行可靠性研究,以确定惯性组件的测量精度是否能够满足特定导航系统的精度要求.从而为特定的导航系统选择具有合适精度的惯性组件提供比全仿真更加可靠、更加接近实际系统的依据.该半实物仿真系统由硬件和软件组成,其系统结构框图如图 4 所示.其中硬件包括惯性测量组件和仿真计算机,惯性测量组件分别采用三个光纤陀螺、三个挠性加速度计及 A/D 数据采集板.这样,以这种方式来验证整个半实物系统运行情况,以便很好监测分析惯性组件精度对整个系统可靠性的影响.

半实物仿真可检测导航系统中的某个测量器件发生故障或精度偏大以及环境对导航系统的影响的随机性.在一定初始条件下进行仿真,通过测试分析导航系统的姿态、速度、经纬度变化曲线(略)可知,其导航误差以舒拉周期在系统中传播,符合理论分析结果,但速度误差很大,且东向速度误差最大.这可能是由于北向陀螺的随机漂移太大.这样导航参数的误

差较大,其原因是陀螺、加速度计的误差(也可能存在安装误差)都比较大.因此,这些惯性组件不能用于高精度要求的导航系统,只能一般性的应用.

## 7 结论

云模型理论的提出,将模糊性问题亦此亦彼性和隶属度的随机性进行了统一的刻划,用三个数字特征期望值  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  反映语言原子值,以语言值为基础构成规则,实现定性知识的表达,从而较好地解决不确定性的传播和更新问题,实现对不确定性具有良好的继承性和传递性<sup>[4]</sup>.仿真实验表明这种模糊可靠性实验评测分析方法,具有较强的可操作性,又有很强的通用性.

## 参 考 文 献

- 1 Kaoru H. Concepts of probabilistic sets. *Fuzzy Sets and System*, 1981, 5(2):31~46
- 2 Kai-Yuan Cai. System failure engineering and fuzzy methodology an introductory overview. *Fuzzy Sets and System*, 1996, 83(2):113~133
- 3 James Donyak, Ihab W, Donald Wunsch. A theory independent fuzzy probability for system reliability. *IEEE Trans. Fuzzy System*, 1999, 7(2):286~294
- 4 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器. 计算机研究与发展, 1995, 32(6):15~20
- 5 张飞舟,范跃祖,沈程智,李德毅. 基于隶属云发生器的智能控制. 航空学报, 1999, 20(1):89~92
- 6 陈晖. 定性定量互换模型及其应用[学位论文]. 郑州:中国人民解放军通信工程学院, 1999
- 7 李德毅,于全,江光杰. C<sup>3</sup>I 系统可靠性、抗毁性和抗干扰的统一评测. 系统工程理论与实践, 1997, 17(3):23~27

**张飞舟** 现为北京大学博士后. 主要研究方向为智能控制、智能故障检测与诊断、智能交通系统.

**范跃祖,孙先仿** 简介见本刊第 25 卷 2 期.