基于一种匹配函数的ATS资源自动配置方法

付新华 肖明清

(空军工程大学 工程学院，西安 710038)

摘 要：提出采用匹配函数描述测试点与仪器端口的匹配程度，用来指导自动测试系统仪器选型和资源配置.匹配函数采用面向信号的方法构建，综合了测点信号属性与仪器性能参数、仪器可靠性、仪器成本、仪器操作复杂度等因素，使得仪器选型和资源配置策略的制定更符合工程需要.给出了资源配置策略和算法，并对资源配置进行了并行测试优化.通过给出一个典型实例，证明该方法能有效降低测试成本，增强系统可靠性，提高测试效率和吞吐量，并为自动测试系统硬件设计的自动化奠定了基础.

关 键 词：自动测试；匹配函数；模型；资源配置；算法

中图分类号：TP 206^{+}.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)12-1392-06

Automatic configuration approach for ATS test resource based on a kind of matching function

Fu Xinhua Xiao Mingqing

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi' an 710038, China)

Abstract: Aiming at the problem of lacking in design automation and generalization during the process of instrument selection and resource configuration of automatic test system(ATS), a kind of matching function was presented to describe the matching degree between test point and instrument port. Matching function was built with signal-oriented method, and it integrated signal properties of test point, capability parameters of instrument, and instrument' s price, reliability, operation complexity and so on. The strategy and algorithm for matching test point and instrument port were proposed. And the strategy was also optimized to meet the requirement of parallel test. The method was validated by an example and the result showed that it could reduce test cost, enhance system reliability and improve test efficiency and throughput.

Key words: automatic testing; matching function; models; resource configuration; algorithms

仪器选型和资源配置是构建ATS(Automatic Test System，自动测试系统)最基本的工作[1-2].仪器选型基于仪器端口和UUT(Unit Under Test，被测对象)测试点匹配的基础之上，仪器端口和测试点的匹配过程实际上就是寻找能满足测试点测试需求仪器的过程.测点与仪器端口的合理配置不仅是完成测试任务的必要条件，还能有效提高测试效率，降低测试成本.传统上测点与仪器端口的配置一般都是由对仪器和测试需求都很熟悉的人员人工完成，虽然是建立在一定的经验基础上，但人工干预很大，效率也较低，而且不利于硬件设计的自动化[3]，增加了测试程序集的设计难度.

本文提出采用匹配函数来描述测试点与仪器端口的匹配程度.匹配函数采用面向信号的方法构建，其综合了测点信号属性与仪器性能参数、仪器可靠性、成本及操作复杂度等因素.基于匹配函数，给出了资源配置策略和算法，并对资源配置进

收稿日期：2007-12-17

基金项目：总装备部"十一五"预先研究资助项目(51317030103)

作者简介：付新华(1980—)，男，湖南攸县人，博士生，fuxinhua_003@163.com.

行了并行测试优化.最后通过一个典型实例,证明了该方法的有效性和实用性.

1　ATS 资源配置模型

设 ATS 备选仪器资源集为$\{I_1, I_2, \cdots, I_n\}$,仪器 I_i 的端口集为$\{h_{i1}, h_{i2}, \cdots, h_{ik_i}\}(i=1,2,\cdots,n)$.UUT 测试端口集为$\{J_1, J_2, \cdots, J_m\}$,端口 J_p 的测试点集合为$\{c_{p1}, c_{p2}, \cdots, c_{pq_p}\}(p=1, 2, \cdots, m)$.测点与仪器端口的配置模型可用图 1 所示映射关系描述.测点与仪器端口的匹配程度可用匹配函数来刻画,匹配函数值作为测点与仪器端口连线上的权值.

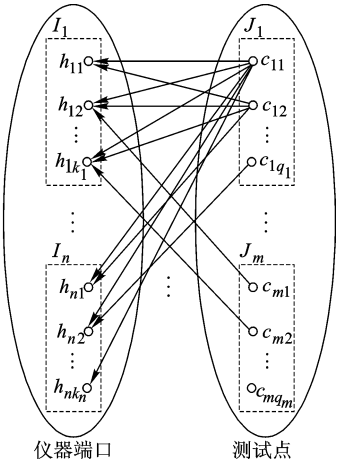


图 1　测点与仪器端口配置模型

2　匹配函数

2.1　影响因素

测点与仪器端口的匹配程度一般与以下几个因素有关[1-3]:①测点信号属性与仪器性能参数:测试的最终目的是检测信号的特征,仪器选型最基本的依据就是所选仪器的性能参数能够满足信号测试的需要.②仪器可靠性:可靠性低的仪器易发生故障,耽误任务完成,在多个仪器均能完成测试任务的情况下优先选用可靠性高的仪器.仪器可靠性可用平均故障间隔时间 MTBF(Mean Time Between Failures)描述.③仪器成本:降低测试成本一直是测试界追求的目标,成本低的仪器应优先考虑.④仪器设置复杂度:测点的测试用时取决于测点信号属性和仪器设置复杂度两个方面.仪器设置复杂度是影响 ATS 测试效率和吞吐量的重要因素,仪器设置复杂度可用仪器平均设置时间 MST(Mean Set Time)衡量.在进行仪器匹配时,MST 小的仪器应赋予大的选用权值.

2.2　基本信号模型

利用面向信号的思想描述仪器能力与测试需求是测试领域的一个重大进步,基于面向信号思想产生了以 ATLAS(Abbreviated Test Language for All Systems)为代表的面向信号编程语言[4-5].面向信号模型建立在分层组件模型之上,如图 2.

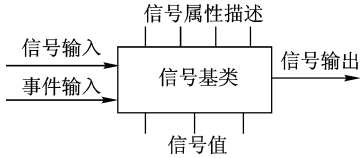


图 2　面向信号模型

一个信号可由下面要素确定[6]:①信号功能:激励、测量.②信号类型:直流、交流、调幅等;③信号属性:信号包含的属性参数,如频率、幅度、分辨率、准确度等;④属性值:各属性参数的取值,数值或范围;⑤信号端子:信号的输入/输出端子.

不同类型的信号其包含属性参数的种类一般也不同,每个属性参数在信号处于激励或测量状态下的描述需求也不完全相同.结合 ATLAS 标准中关于信号的表述规范,采用结构的方法来描述.不失一般性,信号 s 可表示成

$$s=\{F,T,P,H\}$$

式中,F 为信号功能;T 为信号类型;P 为属性集,$P=\{p_1, p_2, \cdots, p_n\}$,集合中 p_i 为基本属性参数,p_i 的取值范围为$[v_{i\min}, v_{i\max}](i=1, 2, \cdots, n)$,表示信号属性值或范围;$H$ 为信号端子集,$H=\{h_1, h_2, \cdots, h_m\}$.

定义 1　属性参数归向化是指对信号的属性参数进行适当的处理,使得信号的各属性参数值都正比或反比于信号的优劣.若为正比则称为归大化处理,若为反比则称为归小化处理.

例如电压量程正比于仪器能力,而分辨率反比于仪器能力即分辨率的最小数值代表仪器的最大精度.可对分辨率取倒数使得电压量程和分辨率都正比于仪器能力,从而便于信号的处理.

定义 2　已知同功能同类型的两个信号 A 和 B,即 $F(A)=F(B)$,$T(A)=T(B)$.其属性集分别为 $P^A=\{p_1^A, p_2^A, \cdots, p_n^A\}$ 和 $P^B=\{p_1^B, p_2^B, \cdots, p_m^B\}$,$p_i^A$ 的取值为$[v_{i\min}^A, v_{i\max}^A](i=1,2,\cdots,n)$,$P_j^B$ 的取值为$[v_{j\min}^B, v_{j\max}^B](j=1,2,\cdots,m)$.

1) 若 $\forall p_k \in P^A$ 有 $p_k \in P^B$ 且 $\forall p_k \in P^B$ 有 $p_k \in P^A$,即 A,B 的属性集包含相同的属性参数,则称 A 与 B 同构,记作 $A \cong B$.

2) 若 A 与 B 同构且属性参数经归大化处理后,$\forall p_k \in P^A$,有$[v_{k\min}^A, v_{k\max}^A] \subset [v_{k\min}^B, v_{k\max}^B]$,则称 B 覆盖 A,记作 $B \succ A$.

3) 若 A 与 B 同构且属性参数经归大化处理,则信号 A 和 B 的距离定义为

$$\| A-B \| = \left\{ \sum_{k=1}^{N} \left[\frac{(v_{k\max}^{A}-v_{k\min}^{A})/2+v_{k\min}^{A}}{\max\{v_{k\max}^{A},v_{k\max}^{B}\}-\min\{v_{k\min}^{A},v_{k\min}^{B}\}} - \frac{(v_{k\max}^{B}-v_{k\min}^{B})/2+v_{k\min}^{B}}{\max\{v_{k\max}^{A},v_{k\max}^{B}\}-\min\{v_{k\min}^{A},v_{k\min}^{B}\}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

式中,N 为 P^A 的元素个数.

例 1 已知 A 的属性集 $P^A=\{$电压:105~125 V,频率:395~405 Hz,精度:0.1%,电流:0~1.5 A$\}$,B 的属性集 $P^B=\{$电压:0~300 V,频率:0~1 kHz,精度:0.02%,电流:0~2 A$\}$,且 A 与 B 同功能同类型. ①显然 $A\cong B$;②属性参数归大化处理:$P^A=\{$电压:105~125 V,频率:395~405 Hz,精度:0~1 000,电流:0~1.5 A$\}$,$P^B=\{$电压:0~300 V,频率:0~1 kHz,精度:0~5 000,电流:0~2 A$\}$;③$B\succ A$;④$\| A-B \|=0.4463$.

定义 3 已知信号集 $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_n\}$ 和单信号 A.

1) 若 $\forall s_k\in S$,有 $s_k\cong A$,则称信号集 S 与 A 同构,同样记作 $S\cong A$,并称 S 为 A 的同构集.

2) 若 $\exists s_k\in S$,使得 $s_k\cong A$,则称信号集 S 与 A 广义同构,记作 $S\cong\cong A$,并称 S 为 A 的广义同构集.

3) 若 $\forall s_k\in S$,有 $s_k\succ A$,则称信号集 S 覆盖 A,同样记作 $S\succ A$,并称 S 为 A 的覆盖集.

4) 若 $\exists s_k\in S$,使得 $s_k\succ A$,则称信号集 S 广义覆盖 A,记作 $S\succ\succ A$,并称 S 为 A 的广义覆盖集.

2.3 匹配函数的确定

仪器功能具有多样性,其端口 h 的性能可用信号集 $S(h)=\{s_1,s_2,\cdots,s_n\}$ 描述,而测点 c 上的信号是单一的,不妨记为 s_c. 设 ATS 备选仪器资源集所有端口为 $H=\{h_1,h_2,\cdots,h_m\}$,端口 h_i 所属仪器的 MTBF 记作 $r(h_i)$,价格成本记作 $q(h_i)$,仪器 MST 记作 $w(h_i)$. 仪器端口 h_i 能完成测点 c 测试的前提条件是:h_i 上的信号集 $S(h_i)$ 中存在与 s_c 功能和类型一样且属性参数值能覆盖 s_c 的信号,即 $S(h_i)\succ\succ s_c$. 记 $S^c(h_i)$ 为端口 h_i 上与 s_c 匹配的信号集,即 $S^c(h_i)=\{s_j\mid s_j\in S(h_i)\wedge s_j\succ s_c\}$;$H^c$ 为能够完成测点 c 测试的仪器端口集,$H^c=\{h_k\mid h_k\in H\wedge S(h_k)\succ\succ s_c\}$;$Z^c(h_i)=\{s_j\mid s_j\in S(h_i)\wedge s_j\cong s_c\}$,$Z^c(h_i)$ 中的信号虽然可能不能匹配 s_c,但却与 s_c 同构,其经过适当信号调理之后就可与 s_c 匹配;G^c 为所有能与测点 c 同构的仪器端口的集合,$G^c=\{h_k\mid h_k\in H\wedge S(h_k)\cong\cong s_c\}$.

测点 c 与仪器端口 h 的匹配函数可定义为

$$M(c,h)=\begin{cases}\mathrm{e}^{-x}\cdot R(h)\cdot Q(h)\cdot W(h) & |S^c(h)|>0\\ -1 & |S^c(h)|=0\wedge|Z^c(h)|>0\\ 0 & \text{其它}\end{cases} \tag{1}$$

式中,x 为信号距离,$x=\min\{\| s_j-s_c \| \mid s_j\in S^c(h)\}$;$|S^c(h)|$ 为 $S^c(h)$ 的元素个数;$|Z^c(h)|$ 为 $Z^c(h)$ 的元素个数;$R(h)$ 为可靠性相对因子;$Q(h)$ 为成本相对因子;$W(h)$ 为操作复杂度相对因子. $R(h)$,$Q(h)$ 和 $W(h)$ 的表达式分别如下:

$$R(h)=\frac{r(h)-\min\limits_{h_i\in H^c}\{r(h_i)\}}{\max\limits_{h_i\in H^c}\{r(h_i)\}-\min\limits_{h_i\in H^c}\{r(h_i)\}}$$

$$Q(h)=\frac{\max\limits_{h_i\in H^c}\{q(h_i)\}-q(h)}{\max\limits_{h_i\in H^c}\{q(h_i)\}-\min\limits_{h_i\in H^c}\{q(h_i)\}}$$

$$W(h)=\frac{\max\limits_{h_i\in H^c}\{w(h_i)\}-w(h)}{\max\limits_{h_i\in H^c}\{w(h_i)\}-\min\limits_{h_i\in H^c}\{w(h_i)\}}$$

式(1)可以简单的解释为:测点与仪器端口的匹配程度不仅取决于测点的信号属性和仪器的性能参数相近的程度,还受到仪器可靠性、成本、操作复杂度等因素的制约.

3 资源配置策略

3.1 匹配模式

测点在匹配仪器的过程中存在下面 3 种情况[1]:①存在合适的仪器端口. 当有多个仪器满足匹配要求时,应当对各匹配仪器进行综合评价,并给出选择列表以便选择最合适的仪器,式(1)的第 1 种情况. ②仪器端口信号功能和类型匹配但不满足量程或范围要求. 这时必须选择合适的信号调理模块进行适当的信号放大或衰减等,式(1)的第 2 种情况. ③没有合适的仪器端口. 这时只有增加新的测试仪器或设计专用测试电路,式(1)的第 3 种情况.

3.2 资源配置策略和流程

资源配置策略是指以一定的控制策略为各测试点选择最佳的仪器资源以实现 UUT 的完备测试. 图 3 为典型 ATS 硬件设计流程,资源配置是自动测试系统硬件设计的首要环节,是进行测试适配器、开关网络等设计的基础[7].

资源配置的具体操作步骤如下:

1) 根据 UUT 信息列写出所有测点的集合

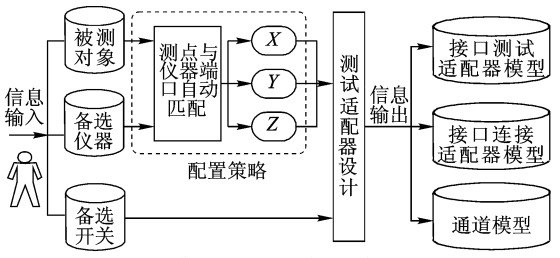


图 3　典型 ATS 硬件设计流程图

$C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$，并建立各测点上的信号模型 s_{c_i}.

2）根据备选仪器信息列写出所有仪器端口的集合 $H=\{h_1,h_2,\cdots,h_m\}$，并建立各仪器端口上的信号集模型 $S_{h_j}=\{s_{j1},s_{j2},\cdots,s_{jk_j}\}$.

3）令 $i=1$.

4）计算能够完成测点 c_i 测试的仪器端口集 H^{c_i} 及能与测点 c_i 同构的仪器端口集 G^{c_i}：

① 若 $|H^{c_i}|>0$，计算 H^{c_i} 中各仪器端口 h_k 与测点 c_i 的匹配函数值 $M(c_i,h_k)$，找到最大 M 所对应的仪器，并按 M 值从大到小形成选择链表 L_{c_i}，同时将测点 c_i 记录在集合 X 中；

② 若 $|H^{c_i}|=0\wedge|G^{c_i}|>0$，记下 G^{c_i} 中各端口所对应的仪器，并将测点 c_i 记录在集合 Y 中；

③ 若 $|G^{c_i}|=0$，则将测点 c_i 记录在集合 Z 中.

5）$i=i+1$，转至 4）.

将所有测点都进行资源配置之后，其理想情况下的最佳配置是：Y 和 Z 均为空集. 而实际工程中往往不是这样，Y 和 Z 中均会包含少量测点. 这时对于 Y 中的测点必须经过适当的信号调理之后才能与仪器端口匹配，对于 Z 中的测点必须增加新的仪器或设计专用电路等. 为获得更好的资源配置，往往将 Y，Z 中的测点进行处理之后再重新进行一次资源配置，只是建立测点上的信号模型时必须换成处理之后的信号.

3.3　配置策略的并行测试优化

上述配置策略仅仅只是寻求测点与仪器端口之间的最佳匹配，没有考虑测点之间的并行测试，也就是同时对多个测点进行测试. 通过采用并行测试技术可以进一步提高测试系统的吞吐量，减少测试设备的闲置时间，提高资源利用率等[8]. 要实现并行测试首先就要对 UUT 的测试任务进行合理的分解，找到可以并行测试的测点；其次就是将能够实现并行测试的多个测点同时引入到仪器端口，并且仪器端口不冲突. 此时在 3.2 节完整配置策略的基础上加上以下 2 步即可.

1）将测点集合 C 按可并行测试性进行划分，得到一个分划 $\pi=\{B_1,B_2,\cdots,B_N\}$. 显然 π 中的任何一个元素 B_l 均为 C 的子集（其包含的各测点可以同时测试），π 中的任意两个互异元素无交集，且所有元素的并集就为 C.

2）$\forall c_\alpha\in B_l(l=1,2,\cdots,N)$，在其对应选择链表 L_{c_α} 中选择合适的仪器端口，使得 B_l 中各测点所匹配的仪器端口尽可能彼此互异且独立. 遍历所有 B_l.

值得指出的是，在仪器资源受限的情况下要实现所有能够可并行测试测点的并行测试是不可能的. 上述优化只是尽可能的实现测点的最大并行度，即不同时刻可同时测试的测点的平均个数最多，各测点的合理测试顺序以及共享仪器资源的冲突必须借助并行测试调度算法来解决[9].

4　实例分析

已知某 UUT 的测点集信号模型如表 1 所示，备选仪器端口集的信号模型如表 2 所示. 表 2 中仪器成本数据经过数据标准化处理.

表 1　某 UUT 测点集信号模型

测点编号	信号名称	信号功能	信号类型	属性参数集
1	安全距离	测量	TA	阈值：11.5 V，时间：291～309 ms，分辨率：0.01 ms
2	陀螺频率	测量	AF	频率：10～14 Hz，分辨率：0.1 Hz
3	超前偏置	测量	DC	电压：2.36～3.20 V，分辨率：0.01 V
4	调压器 1	测量	DC	电压：(11.5±0.1)V，分辨率：0.01 V
5	调压器 2	测量	DC	电压：(23±0.4)V，分辨率：0.01 V
6	自动增益	测量	DC	电压：－9.4～－8.3 V，分辨率：0.01 V
7	碰撞开关	测量	DC	电压：(0±0.5)V，分辨率：0.01 V
8	变流机 A 相	测量	AC	电压：105～120 V，分辨率：0.01 V
9	变流机 B 相	测量	AC	电压：105～120 V，分辨率：0.01 V
10	变流机 C 相	测量	AC	电压：105～120 V，分辨率：0.01 V
11	供电电源	激励	DC	电压：25～27 V，电流：0～1 A，精度：10%
12	信号地	测量	EARTH	
13	联锁	测量	COM	阻抗：0～5 Ω，分辨率：0.1 Ω
14	电源地	激励	EARTH	

注：TA—时间分析；AF—交流频率；DC—直流电压；AC—交流电压；EARTH—地信号；COM—对公用端电阻.

表2 备选仪器端口集的信号模型

仪器编号	成本	MTBF/h	MST/s	端口序号	端口名称	信号功能	信号类型	属性参数集
I001	2	10 000	1/30	1	HI	测量	DC	电压:−300～300 V,分辨率:$6\frac{1}{2}$
						测量	AC	电压:−300～300 V,分辨率:$6\frac{1}{2}$
						测量	AF	频率:0～300 kHz,分辨率:$6\frac{1}{2}$
						测量	COM	阻抗:0～100 MΩ,分辨率:$6\frac{1}{2}$
				2	I	测量	I	电流:0～3 A,分辨率:$6\frac{1}{2}$
I002	3	8 000	1/10	1	CH0	激励	DC	电压:0～8 V,电流:0～16 A,精度:1%
				2	CH1	激励	DC	电压:0～35 V,电流:0～4.5 A,精度:1%
				3	CH2	激励	DC	电压:0～200 V,电流:0～0.75 A,精度:1%
I003	1	10 000	1/20	1～64	CH0～CH63	测量	DC	电压:−16～16 V,分辨率:12 bit
I004	1.5	10 000	1/30	1	HI	测量	DC	电压:−300～300 V,分辨率:$5\frac{1}{2}$
						测量	AC	电压:−300～300 V,分辨率:$5\frac{1}{2}$
						测量	AF	频率:0～300 kHz,分辨率:$5\frac{1}{2}$
						测量	COM	阻抗:0～10 MΩ,分辨率:$5\frac{1}{2}$
				2	I	测量	I	电流:0～3 A,分辨率:$5\frac{1}{2}$
I005	2	12 000	1/40	1～8	CH0～CH7	测量	TA	阈值:15 V,时间:0～30 s,分辨率:0.01 μs
I006	6	10 000	1/10	1～2	CH0～CH1	测量	AF	频率:0～100 MHz,分辨率:0.001 Hz
						测量	AC	电压:−30～30 V,分辨率:0.001 mV
						测量	DC	电压:−30～30 V,分辨率:0.001 mV

注:HI—万用表高端;I—万用表电流端;CH—通道;信号类型 I—电流.

对属性参数进行归向化和标准化处理后,利用本文提出的匹配函数以及资源配置策略,借助开发的测点与资源自动配置软件,得到表3所示的配置方案.地线的连接关系可通过其对应信号线连接关系确定.

表3 测点与仪器端口的自动匹配方案

测点编号	1	2	3	4	5	6
仪器端口	I005 CH0	I004 HI	I003 CH0	I003 CH1	I004 HI	I003 CH2
测点编号	7	8	9	10	11	13
仪器端口	I003 CH3	I004 HI	I004 HI	I004 HI	I002 CH1	I004 HI

在匹配过程中,仪器 I001 和 I006 虽然也可以满足部分测点的测试需求,但因为成本高、仪器操作繁杂等原因而弃用.各测点匹配的仪器端口尽可能独立,避免出现大量测点匹配同一仪器端口的现象,从而可以简化测试适配器中开关网络的设计,保证信号路由通道的独立性和并行性.

5 结 论

提出采用匹配函数刻画测点与仪器端口的匹配程度.匹配函数综合了测点信号属性与仪器性能参数、成本、可靠性以及操作复杂度等因素,使得仪器选型和资源配置策略更符合工程需要.给出了资源配置策略和算法,并对资源配置进行了并行测试优化.通过该算法可以获得最佳的测点与资源配置方案,从而能有效地提高测试效率,降低测试成本,并为 ATS 硬件设计的自动化奠定了基础.

参考文献(References)

[1] Sun Baojiang, Qin Honglei, Shen Shituan. An automatic design technique for hardware system of ATS[C]//Autotestcon proceedings. Piscataway: IEEE, 2006: 386−396

[2] 李行善,左毅,孙杰. 自动测试系统集成技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2004
Li Xingshan, Zuo Yi, Sun Jie. Integrated technology for automatic test system[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004(in Chinese)

[3] 孙宝江,秦红磊,胡文明,等. 自动测试系统适配器自动设计技术[J]. 航空学报, 2007, 28 (3):703−707
Sun Baojiang, Qin Honglei, Hu Wenming, et al. Automatic design for general purpose test unit adapter of automatic test system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28 (3):703−707(in Chinese)

[4] IEEE Std 716-1995, Abbreviated test language for all sys-

tems[S]

[5] 陈粤,边泽强,孟晓风.基于信号参数集最小距离的并行测试任务调度算法[J].系统仿真学报,2006,18(9):2409－2411
Chen Yue, Bian Zeqiang, Meng Xiaofeng. The algorithm for task scheduling based on the minimum distance in the signal parameters set[J]. Journal of System Simulation, 2006,18(9):2409－2411 (in Chinese)

[6] Ramachandran N, Oblad R P, Neag I A, et al. The role of a signal interface in supporting instrument interchangeability [C]// Autotestcon Proceedings. Anaheim: IEEE, 2000: 337－343

[7] 赵瑞贤,孟晓风,王国华.通用 ATE 开关资源测试路径模型及应用[J].北京航空航天大学学报, 2006, 32(2):181－185
Zhao Ruixian, Meng Xiaofeng, Wang Guohua. General-utility testing path model of switches for ATE and application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 181－185(in Chinese)

[8] 肖明清,朱小平,夏锐.并行测试技术综述[J].空军工程大学学报, 2005, 6(3):22－25
Xiao Mingqing, Zhu Xiaoping, Xia Rui. Summary of parallel test technology [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2005, 6(3): 22－25(in Chinese)

[9] 夏锐,肖明清,程进军.基于混合遗传退火算法的并行测试任务调度优化[J].系统仿真学报,2007,19(15):3564－3567
Xia Rui,Xiao Mingqing,Cheng Jinjun. Optimization for the parallel test task scheduling based on hybrid GASA [J]. Journal of System Simulation,2007,19(15):3564－3567(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)

(上接第 1391 页)

试飞的结果进一步证明,碟型飞行器具有良好的纵向稳定性和操纵性,飞行性能优秀.同时试飞实验还证明,碟形飞行器具有起飞滑跑距离短(75.4 m),失速迎角大,不尾旋等特点.

3　结　论

碟形飞行器纵向稳定,短周期和长周期模态分别满足 1 级,2 级的飞行标准.能稳定飞行使得具有布局紧凑、升力面积和载物空间大、型阻小等优点的碟形飞行器可以广泛应用于舰载机,无人侦察机,电子预警机等领域.另外,较大的机身厚度和结构强度使得在碟形飞行器上进行附面层控制[12]的可行性大为提高,从而能使碟形飞行器成为优秀的载重机型.

参考文献(References)

[1] Liebeck R H. Design of the blended-wing-body subsonic transport[R]. AIAA-02-13493, 2002

[2] Ricketts R H,Noll T E, Woodrow W J,et al. An overview of aeroelasticity studies for the national aero-space plane [R]. AIAA-93-1313-CP, 1993

[3] Murphy K J,Nowak R J,Thompson R A, et al. X-33 hypersonic aerodynamic characteristics[R]. AIAA-99-4162, 1999

[4] Yu Junli,Wang Linlin,Gao Ge. Using wing tip devices to improve performance of saucer-shaped aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006,19(4):309－314

[5] 李晓勇,张森,鲁素芬,等.翼身融合飞机的空气动力学研究进展[J].飞机设计,2007,27(2):1－2
Li Xiaoyong,Zhang Miao,Lu Sufeng, et al. Advances in aerodynamics for blended-wing-body aircraft[J]. Aircraft Desin, 2007,27(2):1－2(in Chinese)

[6] Kresse N. Challenges and potential of BWB configuration (results of the projects VELA-very large aircraft)[R]. Fifth Community Aeronautical Days 2006, 2006

[7] Gibson C S,Vess R J,Pegg R. Low speed testing of an X-43A hypersonic lifting body configuration[R]. AIAA-03-7086, 2003

[8] Mras P J,Humphreys D E,Langehough M A. DarkStar flight control system design[R]. Association for Unmanned Vehicle Systems International Annual Symposium Exhibition, 1999

[9] 马松辉,吴成富,陈怀民.飞翼飞机稳定性与操作性研究[J].飞行力学,2006,24(3):18－19
Ma Songhui,Wu Chengfu,Chen Huaimin. Study on stability and manoeuvrability of flying wing aircraft[J]. Flight Dynamics, 2006,24(3):18－19(in Chinese)

[10] 吴森堂,费玉华.飞行控制系统[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:73－88
Wu Sentang,Fei Yuhua. Flight control systems[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2005:73－88(in Chinese)

[11] GJB185-86.有人驾驶飞机(固定翼)飞行品质[S]
GJB185-86. Flying qualities of piloted planes (fixed wings) [S](in Chinese)

[12] 王劲东,沈遐龄,高歌.碟形升力体的低速特性研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(4):346－349
Wang Jindong,Shen Xialing,Gao Ge. Experimental research of low speed aerodynamic characteristics of saucer-like lifting body[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2003,29(4):346－349(in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)