

多喷嘴系统控制律

黄 圳 珪

(自动控制系)

摘要 大型航天器(航天飞机、空间站等)的反作用控制系统(RCS)是由多喷嘴组成,具有较高的冗余度。本文对此系统提出一种控制律,包括控制指令的产生与分配的方法,编成程序包后,便于机载计算机实时操作。

关键词 自动控制;计算机;多喷嘴系统;控制律

1. 引 言

大型航天器(航天飞机、空间站等)的RCS系统是由数目很多的喷嘴或推力器组成,用于轨道飞行段的轨道控制与姿态控制,具有较高的冗余度,以确保系统的可靠性。例如美国的航天飞机轨道器的RCS系统共有44台推力器。包括38台大推力器与6台小推力器,分别装在头部与尾部两侧的三个舱内,其安装位置与羽流方向如图1所示。大推力器真空推力396公斤,小推力器真空推力11.3公斤。美国航天飞机轨道器还装有轨道机动系统(OMS),包括两台轨道机动发动机,RCS与OMS共同完成轨道器入轨、离轨与轨道飞行的轨道控制与姿态控制。RCS不但用于姿态控制,还要辅助轨道控制。

RCS的控制律是根据位置误差 E 与速率误差 \dot{E} (包括线位置与角位置误差,线速度与角速度误差)产生控制指令矢量,并根据指令矢量进行选择,命令相应的喷嘴工作,以提供所需要的线冲量与角冲量。本文是以美国航天飞机轨道器的RCS为例讨论RCS控制律的一种设计方法。限于篇幅,不涉及RCS与OMS的联合与交接,以及轨道控制与姿态控制的其它问题。

下面先讨论指令矢量的分配,也即喷嘴的选择问题,然后再讨论指令矢量的产生问题。

2. 指令矢量的分配

指令矢量,是指控制任务要求RCS产生的线冲量与角冲量矢量。对刚性航天器来说,控制任务一般包括沿体轴 x 、 y 、 z 三轴的质心运动控制与绕质心的俯仰、滚动与

3. 喷嘴组合编排

下面以美国航天飞机的 RCS 为例说明喷嘴组合的编排方法。美国航天飞机 RCS 有 38 个大推力器与 6 个小推力器。假设控制过程分为粗控、精控与极限环维持三步，则相应的档次可这样组成：大推力器的组合分为两档，分别用于粗控与精控，小推力器的组合用于姿态控制的极限环维持。

由于小推力器可靠性高，冗余度等于零，其组合没有选择余地。下面仅就大推力器组合的编排问题进行讨论。

根据大推力器的安装位置与推力方向可分为四类。各类推力器的工作有相对独立性，相应的组合没有交连影响。

1) x 轴组合

与 x 轴有关的推力器标号、位置与方向的分布示意图表示于图 2。

这类推力器共 7 台，相应的组合如附表 1 所示。表中每个括号内的推力器组成一个组合，每个组合的选择都符合前述的精选原则。每一轴的组合只取两档。每档的组合按一定顺序排列，以便于检索。

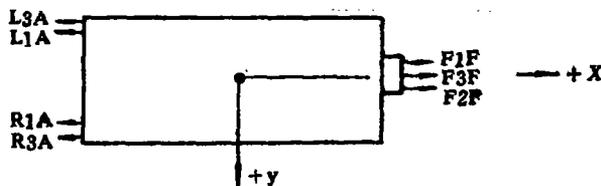


图 2 x 轴推力器分布示意图

2) y 轴与偏航轴组合

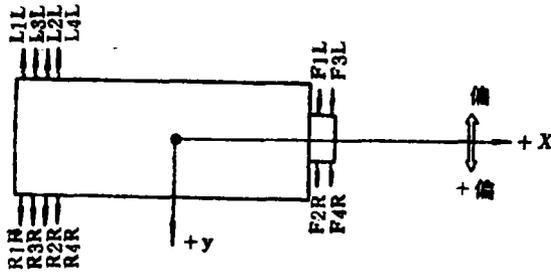
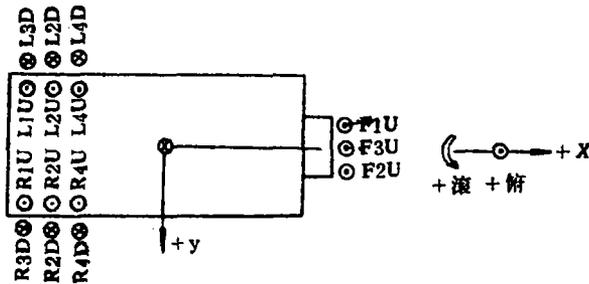
这类推力器共 12 台，分布示意图表示于图 3，相应的组合如附表 2 所示。表中除了列入 $+y$ 、 $-y$ ， $+偏$ 和 $-偏$ 等单轴的组合外，还列入 $+y \oplus +偏$ ， $+y \oplus -偏$ ， $-y \oplus +偏$ 和 $-y \oplus -偏$ 等耦合轴的组合。耦合轴的组合用较少的推力器以产生多轴的控制量，因此优于单轴的组合。

3) z 轴、俯仰轴与滚动轴组合

这类推力器共 15 台，分布示意图如图 4，相应的组合如附表 3 所示。从该表可看出，根据优化原则选择的组合，其 $+z$ 轴与 $-俯$ 轴只有一档的组合，而且 $-z$ 轴与 $+俯$ 轴没有相应组合。这说明美国航天飞机的 RCS 对 z 轴与俯仰轴的控制功能是不全面的。

4) 斜装推力器组合

在轨道器头部装有 F1D、F2D、F3D、与 F4D 等四个斜装大推力器，其推力方向平行于 yz 平面，且与 $-z$ 轴夹角为 45° ，作为正装推力器的补充。此推力器能提供的组合列于附表 4。另外，同正装推力器构成的组合可产生 $-z$ 轴与 $+俯$ 轴的控制量，如附表 5 所示，以补充正装推力器的功能。但是这些组合带有附加力与力矩而不符合优化原则，斜装推力器还可以提供其它的组合。由于这些组合均不符合优化原则，是否录用要进一步研究。

图 3 y 轴与偏航轴推力器分布示意图图 4 z 轴、俯仰轴与滚动轴推力器分布示意图

⊗ 羽流方向沿 z 轴 ⊙ 羽流方向沿 $-z$ 轴

4. 指令矢量的分配与组合的检索

指令矢量的分配就是根据指令矢量的各个分量检索相应的控制轴，再由控制轴检索相应的组合。为了确保可靠性与合理性还需作如下规定。

1) 单轴组合与耦合轴组合

单轴组合数目多、冗余度大、是系统正常工作的保证。耦合轴组合较优，但数目少，还可能为空集，因此指令矢量分配时应优先检索耦合轴组合，当为空集时再检索单轴组合。

2) 低档组合与高档组合

高档组合的数目较少。当为空集时就会用低档组合。

3) 正常选择与失效选择

每一轴的组合按一定顺序编号后，第 1 号组合作为正常检索对象。当第 1 号组合失效后，立即自动注销，并把第 2 号晋升为第 1 号，依此类推。当某一单轴两档的组合均为空集时，则相应的指令矢量无法执行，并立即向中心计算机报警。

5. 相平面开关曲线

指令矢量的各个分量是由各控制轴的误差(E , \dot{E})相平面上的开关曲线来确定。假设控制过程分粗控、精控与极限环维持三步，则相应的开关曲线与控制律可按优化原则

确定如下。

1) 粗控律

粗控是指把初始较大的位置与速率的误差在较短时间内控制到较小的范围, 其优化指标为时间短与开关次数少, 一般要用高档组合。开关曲线可选图 5 的控制律。开机一次就可把初始相点送入精控区, 其开关控制可用上半平面相点为例说明如下(表 1)。

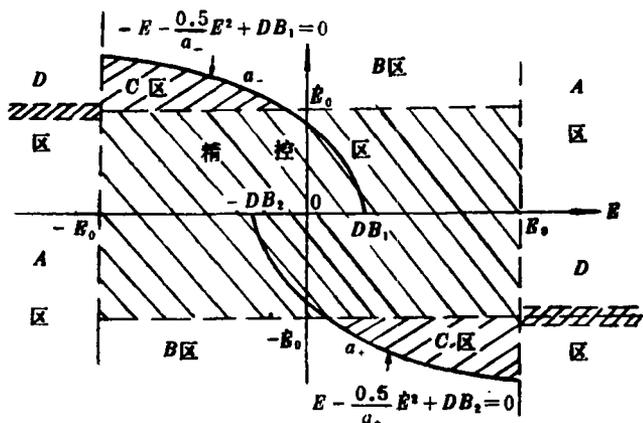


图 5 粗控律相平面

a_+ 正控制轴组合产生的加速度 推力器关闭
 a_- 负控制轴组合产生的加速度 推力器启动

表 1

相点位置	工 作 时 间
A 区	以 a_- 把 \dot{E} 减至 $-\dot{E}_0$ 时关机
B 区	以 a_- 把 \dot{E} 减至 \dot{E}_0 时关机
C 区	不工作
D 区	$\begin{cases} \dot{E} < \dot{E}_0 & \text{以 } a_+ \text{ 把 } \dot{E} \text{ 加至 } \dot{E}_0 \text{ 时关机} \\ \dot{E} \approx \dot{E}_0 & \text{不工作} \\ \dot{E} > \dot{E}_0 & \text{以 } a_- \text{ 把 } \dot{E} \text{ 减至 } \dot{E}_0 \text{ 时关机} \end{cases}$

2) 精控律

精控的优化指标是精度高, 燃料省, 一般用低档组合, 开关曲线可选图 6。

上半平面相点的开关控制如表 2。

图 6 中的 3 区是用于极限环维持。当相点在干扰作用下到达 3 区时, 则用最小冲量(美国航天飞机 RCS 的最小脉冲宽度为 80 毫秒)把相点推回到极限环内。

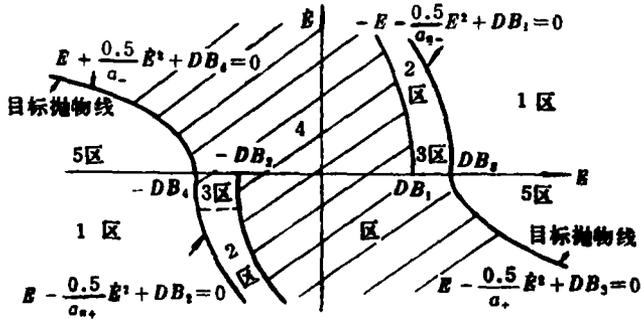


图 6 精控律相平面

a_+ 与 a_- 含义如上图, a_{n+} 与 a_{n-} 分别为正与负轴的总加速度

表 2

相点位置	工 作 时 间
1 区	以 a_- 把相点推移到 a_+ 的目标抛物线时关机
2 区	以 a_- 把相点推移到 E 轴时关机
3 区	以低档组合或小推力器组合按最短时间工作
4 区	不开机、如果已经开机, 则把相点推移到 E 轴
5 区	以 a_+ 把相点推移到 a_- 的目标抛物线时关机

6. 框图与结束语

本文是对 RCS 系统指令矢量的产生与分配问题作一方法性探讨。这一方法既考虑

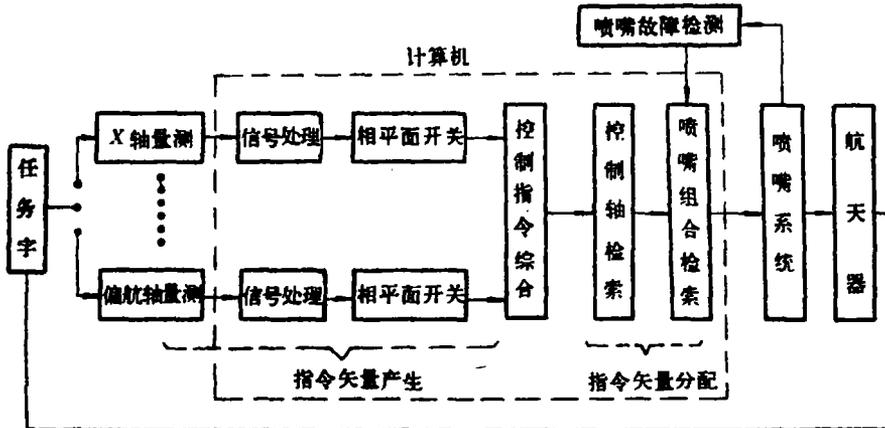


图 7

了优化问题又避免了复杂的计算, 而且便于程序编排。系统越复杂、喷嘴越多, 这一方法就越适用。文中虽然以美国航天机的 RCS 为例作方法性说明, 但这一方法对一般的 RCS 系统也可类似讨论。

系统的框图如上(图 7)

附表 1

控制轴	组合的推力器数	推 力 器 组 合	组数
+ x	2	(R1A, L1A), (R1A, L3A), (R3A, L1A), (R3A, L3A)	4
	4	(R1A, R3A, L1A, L3A)	1
- x	1	(F3F), (F1F), (F2F)	8
	2	(F1F, F2F), (F1F, F3F), (F2F, F3F)	8

附表 2

控制轴	组合的推力器数	推 力 器 组 合	组数
+ y	2	(F1L, L1L), (F1L, L2L), (F1L, L3L), (F1L, L4L), (F3L, L1L), (F3L, L2L), (F3L, L3L), (F3L, L4L)	8
	4	(F1L, F3L, L1L, L2L), (F1L, F3L, L1L, L3L) (F1L, F3L, L1L, L4L), (F1L, F3L, L2L, L3L) (F1L, F3L, L2L, L4L), (F1L, F3L, L3L, L4L)	6
- y	2	(F2R, R1R), (F2R, R2R), (F2R, R3R), (F2R, R4R) (F4R, R1R), (F4R, R2R), (F4R, R3R), (F4R, R4R)	8
	4	(F2R, F4R, R1R, R2R), (F2R, F4R, R1R, R3R) (F2R, F4R, R1R, R4R), (F2R, F4R, R2R, R3R) (F2R, F4R, R2R, R4R), (F2R, F4R, R3R, R4R)	6
+ 偏	2	(F1L, R1R), (F1L, R2R), (F1L, R3R), (F1L, R4R) (F3L, R1R), (F3L, R2R), (F3L, R3R), (F3L, R4R)	8
	4	(F1L, F3L, R1R, R2R), (F1L, F3L, R1R, R3R) (F1L, F3L, R1R, R4R), (F1L, F3L, R2R, R3R) (F1L, F3L, R2R, R4R), (F1L, F3L, R3R, R4R)	6
- 偏	2	(F2R, L1L), (F2R, L2L), (F2R, L3L), (F2R, L4L) (F4R, L1L), (F4R, L2L), (F4R, L3L), (F4R, L4L)	8
	4	(F2R, F4R, L1L, L2L), (F2R, F4R, L1L, L3L) (F2R, F4R, L1L, L4L), (F2R, F4R, L2L, L3L) (F2R, F4R, L2L, L4L), (F2R, F4R, L3L, L4L)	6

续表 2

控制轴	组合的推力器数	推力器组合	组数
$+y \oplus +$ 偏	1	(F1L), (F3L)	2
	2	(F1L, F3L)	1
$-y \oplus -$ 偏	1	(F2R), (F4R)	2
	2	(F2R, F4R)	1
$-y \oplus +$ 偏	1	(R1R), (R2R), (R3R), (R4R)	4
	2	(R1R, R2R), (R1R, R3R), (R1R, R4R) (R2R, R3R), (R2R, R4R), (R3R, R4R)	6
$+y \oplus -$ 偏	1	(L1L), (L2L), (L3L), (L4L)	4
	2	(L1L, L2L), (L1L, L3L), (L1L, L4L) (L2L, L3L), (L2L, L4L), (L3L, L4L)	6

附表 3

控制轴	组合内推力器数	推力器组合	组合数
$+z$	4	(F1U, F2U, R1U, L1U), (F1U, F2U, R1U, L2U), (F1U, F2U, R1U, L4U) (F1U, F2U, R2U, L1U), (F1U, F2U, R2U, L2U), (F1U, F2U, R2U, L4U) (F1U, F2U, R4U, L1U), (F1U, F2U, R4U, L2U), (F1U, F2U, R4U, L4U) (F1U, F3U, R1U, L1U), (F1U, F3U, R1U, L2U), (F1U, F3U, R1U, L4U) (F1U, F3U, R2U, L1U), (F1U, F3U, R2U, L2U), (F1U, F3U, R2U, L4U) (F1U, F3U, R4U, L1U), (F1U, F3U, R4U, L2U), (F1U, F3U, R4U, L4U) (F2U, F3U, R1U, L1U), (F2U, F3U, R1U, L2U), (F2U, F3U, R1U, L4U) (F2U, F3U, R2U, L1U), (F2U, F3U, R2U, L2U), (F2U, F3U, R2U, L4U) (F2U, F3U, R4U, L1U), (F2U, F3U, R4U, L2U), (F2U, F3U, R4U, L4U)	27
$-z$			
$+俯$			
$-俯$	4	(F1U, F2U, R2D, L2D), (F1U, F2U, R2D, L3D), (F1U, F2U, R2D, L4D) (F1U, F2U, R3D, L2D), (F1U, F2U, R3D, L3D), (F1U, F2U, R3D, L4D) (F1U, F2U, R4D, L2D), (F1U, F2U, R4D, L3D), (F1U, F2U, R4D, L4D)	27

续 表 3

- 俯	4	(F1U, F3U, R2D, L2D), (F1U, F3U, R2D, L3D), (F1U, F3U, R2D, L4D) (F1U, F3U, R3D, L2D), (F1U, F3U, R3D, L3D), (F1U, F3U, R3D, L4D) (F1U, F3U, R4D, L2D), (F1U, F3U, R4D, L3D), (F1U, F3U, R4D, L4D) (F2U, F3U, R2D, L2D), (F2U, F3U, R2D, L3D), (F2U, F3U, R2D, L4D) (F2U, F3U, R3D, L2D), (F2U, F3U, R3D, L3D), (F2U, F3U, R3D, L4D) (F2U, F3U, R4D, L2D), (F2U, F3U, R4D, L3D), (F2U, F3U, R4D, L4D)	27
+ 滚	2	(R1U, L2D), (R1U, L3D), (R1U, L4D), (R2U, L2D) (R2U, L3D), (R2U, L4D), (R4U, L2D), (R4U, L3D) (R4U, L4D)	9
	4	(R1U, R2U, L2D, L3D), (R1U, R2U, L2D, L4D), (R1U, R2U, L3D, L4D) (R1U, R4U, L2D, L3D), (R1U, R4U, L2D, L4D), (R1U, R4U, L3D, L4D) (R2U, R4U, L2D, L3D), (R2U, R4U, L2D, L4D), (R2U, R4U, L3D, L4D)	9
- 滚	2	(R2D, L1U), (R2D, L2U), (R2D, L4U), (R3D, L1U) (R3D, L2U), (R3D, L4U), (R4D, L1U), (R4D, L2U) (R4D, L4U),	9
	4	(R2D, R3D, L1U, L2U), (R2D, R3D, L1U, L4U), (R2D, R3D, L2U, L4U) (R2D, R4D, L1U, L2U), (R2D, R4D, L1U, L4U), (R2D, R4D, L2U, L4U) (R3D, R4D, L1U, L2U), (R3D, R4D, L1U, L4U), (R3D, R4D, L2U, L4U)	9
+ z [⊕] + 俯	2	(R1U, L1U), (R1U, L2U), (R1U, L4U), (R2U, L1U), (R2U, L2U) (R2U, L4U), (R4U, L1U), (R4U, L2U), (R4U, L4U)	9
	4	(R1U, R2U, L1U, L2U), (R1U, R2U, L1U, L4U), (R1U, R2U, L2U, L4U) (R1U, R4U, L1U, L2U), (R1U, R4U, L1U, L4U), (R1U, R4U, L2U, L4U) (R2U, R4U, L1U, L2U), (R2U, R4U, L1U, L4U), (R2U, R4U, L2U, L4U)	9
- z [⊕] - 俯	2	(R2D, L2D), (R2D, L3D), (R2D, L4D), (R3D, L2D), (R3D, L3D) (R3D, L4D), (R4D, L2D), (R4D, L3D), (R4D, L4D)	9
	4	(R2D, R3D, L2D, L3D), (R2D, R3D, L2D, L4D), (R2D, R3D, L3D, L4D) (R2D, R4D, L2D, L3D), (R2D, R4D, L2D, L4D), (R2D, R4D, L3D, L4D) (R3D, R4D, L2D, L3D), (R3D, R4D, L2D, L4D), (R3D, R4D, L3D, L4D)	9
+ z [⊕] - 俯	1	(F3U), (F1U), (F2U)	8
	2	(F1U, F2U), (F1U, F3U), (F2U, F3U)	8

$-z\oplus$ $+z\oplus$			
$+z\oplus$ $+z\oplus$	2	(F3U, R1U), (F3U, R2U), (F3U, R4U), (F1U, R1U), (F1U, R2U) (F1U, R4U), (F2U, R1U), (F2U, R2U), (F2U, R4U)	9
	4	(F1U, F2U, R1U, R2U), (F1U, F2U, R1U, R4U), (F1U, F2U, R2U, R4U) (F1U, F3U, R1U, R2U), (F1U, F3U, R1U, R4U), (F1U, F3U, R2U, R4U) (F2U, F3U, R1U, R2U), (F2U, F3U, R1U, R4U), (F2U, F3U, R2U, R4U)	9
$+z\oplus$ $-z\oplus$	2	(F3U, L1U), (F3U, L2U), (F3U, L4U), (F1U, L1U), (F1U, L2U) (F1U, L4U), (F2U, L1U), (F2U, L2U), (F2U, L4U)	9
	4	(F1U, F2U, L1U, L2U), (F1U, F2U, L1U, L4U), (F1U, F2U, L2U, L4U) (F1U, F3U, L1U, L2U), (F1U, F3U, L1U, L4U), (F1U, F3U, L2U, L4U) (F2U, F3U, L1U, L2U), (F2U, F3U, L1U, L4U), (F2U, F3U, L2U, L4U)	9
$-z\oplus$ $+z\oplus$			
$-z\oplus$ $-z\oplus$			
$+z\oplus$ $+z\oplus$ $+z\oplus$	1	(R1U), (R2U), (R4U)	8
	2	(R1U, R2U), (R1U, R4U), (R2U, R4U)	8
$+z\oplus$ $+z\oplus$ $-z\oplus$	1	(L1U), (L2U), (L4U)	8
	2	(L1U, L2U), (L1U, L4U), (L2U, L4U)	8
$+z\oplus$ $+z\oplus$ $+z\oplus$	3	(F1U, F2U, R1U), (F1U, F2U, R2U), (F1U, F2U, R4U) (F1U, F3U, R1U), (F1U, F3U, R2U), (F1U, F3U, R4U) (F2U, F3U, R1U), (F2U, F3U, R2U), (F2U, F3U, R4U)	9
	4	(F1U, F2U, F3U, R1U), (F1U, F2U, F3U, R2U) (F1U, F2U, F3U, R4U)	8
$+z\oplus$ $-z\oplus$ $-z\oplus$	3	(F1U, F2U, L1U), (F1U, F2U, L2U), (F1U, F2U, L4U) (F1U, F3U, L1U), (F1U, F3U, L2U), (F1U, F3U, L4U) (F2U, F3U, L1U), (F2U, F3U, L2U), (F2U, F3U, L4U)	9
	4	(F1U, F2U, F3U, L1U), (F1U, F2U, F3U, L2U), (F1U, F2U, F3U, L4U)	8

续 表 3

控制轴	组合内推力器数	推 力 器 组 合	组合数
-z [⊕] -俯 [⊕] -滚	1	(R3D), (R2D), (R4D)	8
	2	(R2D, R3D), (R2D, R4D), (R3D, R4D)	8
-z [⊕] -俯 [⊕] +滚	1	(L3D), (L2D), (L4D)	
	2	(L2D, L3D), (L2D, L4D), (L3D, L4D)	
-z [⊕] + 俯 [⊕] + 滚			
-z [⊕] + 俯 [⊕] - 滚			

附 表 4

控制轴	组合内推力器数	推 力 器 组 合	组数
+y [⊕] - z [⊕] + 俯 [⊕] + 偏	1	(F1D), (F3D)	2
	2	(F1D, F3D)	1
-y [⊕] - z [⊕] + 俯 [⊕] - 偏	1	(F2D), (F4D)	2
	2	(F2D, F4D)	1
-z [⊕] + 俯	2	(F1D, F2D), (F1D, F4D), (F3D, F2D), (F3D, F4D)	4
	4	(F1D, F2D, F3D, F4D)	

附 表 5

控制轴	组合内推力器数	推 力 器 组 合	组数
-z	4	(F1D, F2D, R2D, L2D), (F1D, F2D, R2D, L3D), (F1D, F2D, R2D, L4D) (F1D, F2D, R3D, L2D), (F1D, F2D, R3D, L3D), (F1D, F2D, R3D, L4D) (F1D, F2D, R4D, L2D), (F1D, F2D, R4D, L3D), (F1D, F2D, R4D, L4D) (F1D, F4D, R2D, L2D), (F1D, F4D, R2D, L3D), (F1D, F4D, R2D, L4D) (F1D, F4D, R3D, L2D), (F1D, F4D, R3D, L2D), (F1D, F4D, R3D, L4D) (F1D, F4D, R4D, L2D), (F1D, F4D, R4D, L3D), (F1D, F4D, R4D, L4D) (F3D, F4D, R2D, L2D), (F3D, F4D, R2D, L3D), (F3D, F4D, R2D, L4D) (F3D, F4D, R3D, L2D), (F3D, F4D, R3D, L3D), (F3D, F4D, R3D, L4D) (F3D, F4D, R4D, L2D), (F3D, F4D, R4D, L3D), (F3D, F4D, R4D, L4D)	36

续表 5

控制轴	组合的推力器数	推 力 器 组 合	组数
- z	4	(F2D, F3D, R2D, L2D), (F2D, F3D, R2D, L3D), (F2D, F3D, R2D, L4D) (F2D, F3D, R3D, L2D), (F2D, F3D, R3D, L3D), (F2D, F3D, R3D, L4D) (F2D, F3D, R4D, L2D), (F2D, F3D, R4D, L3D), (F2D, F3D, R4D, L4D)	36
+ 俯	4	(F1D, F2D, R1U, L1U), (F1D, F2D, R1U, L2U), (F1D, F2D, R1U, L4U) (F1D, F2D, R2U, L1U), (F1D, F2D, R2U, L2U), (F1D, F2D, R2U, L4U) (F1D, F2D, R4U, L1U), (F1D, F2D, R4U, L2U), (F1D, F2D, R4U, L4U) (F1D, F4D, R1U, L1U), (F1D, F4D, R1U, L2U), (F1D, F4D, R1U, L4U) (F1D, F4D, R2U, L1U), (F1D, F4D, R2U, L2U), (F1D, F4D, R2U, L4U) (F1D, F4D, R4U, L1U), (F1D, F4D, R4U, L2U), (F1D, F4D, R4U, L4U) (F2D, F3D, R1U, L1U), (F2D, F3D, R1U, L2U), (F2D, F3D, R1U, L4U) (F2D, F3D, R2U, L1U), (F2D, F3D, R2U, L2U), (F2D, F3D, R2U, L4U) (F2D, F3D, R4U, L1U), (F2D, F3D, R4U, L2U), (F2D, F3D, R4U, L4U) (F3D, F4D, R1U, L1U), (F3D, F4D, R1U, L2U), (F3D, F4D, R1U, L4U) (F3D, F4D, R2U, L1U), (F3D, F4D, R2U, L2U), (F3D, F4D, R2U, L4U) (F3D, F4D, R4U, L1U), (F3D, F4D, R4U, L2U), (F3D, F4D, R4U, L4U)	36

参 考 文 献

- [1] B. S. Crawford, Configuration Design and Efficient Operation of Redundant Multi-Jet Systems, AIAA Guidance, Control, and Flight Mechanics Conference 1969-845.
- [2] Kenneth J. Cox, Case study on Apollo Lunar Module Digital Autopilot, University of Colorado August 4, 1969.
- [3] M·M·Nakano, Space Shuttle On-Orbit Flight Control System, AIAA 82-1576.
- [4] A. Penchuk et al, The Digital Autopilot For Thrust Vector Control of the Shuttle Orbital Maneuvering System, AIAA 82-1579.

The Control Law of Multi-Jet System

Hwang Zengwei

Abstract

The reaction Control system (RCS) of large spacecraft (space-shuttle and space-station) consists of multe-jet, so as to have better redundance. This paper presents a control law to this system, which is concerning in constructing and distributing of control command. after programing, it is facile for computer operation in real-time made on board.

Key words: Autocontrol; computer; Multe-jet system; Control law.