基于多约束因素量化与多目标优化的 RCS 冗余配置方法

常 晶，周 军，呼卫军

（西北工业大学 精确制导与控制研究所，陕西 西安 710072）

摘 要： 针对目前可重复使用运载器的 RCS 配置方法主要依靠经验定性分析和反复试凑的局限性以及设计指标单一的问题，提出了一种基于多约束因素量化与多目标优化的 RCS 冗余配置方法。该方法将 RCS 配置中与安装位置、方向、数量、系统性能相关的诸元因素依据其物理机理进行归一化量化处理，综合成一个量化评估指标函数，用定量数学优化法将 RCS 的冗余配置问题转化成普通的非线性规划最优求解问题。最后通过冗余度 2 的配置案例设计和仿真，验证了该方法的有效性和可靠性，表明文中设计的 RCS 配置方法可在设计过程实现量化寻优，实现特定指标，确保系统冗余度要求。

关 键 词： RCS 冗余配置，影响因素量化，定量配置，非线性规划，综合评估

中图分类号： V448.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000-2758(2013)05-0677-06

新一代 RLV 追求高性能和高可靠性的设计理念，这使得姿态动力系统的冗余配置和故障重构技术成为当前亟待解决的关键技术问题。RLV 主要采用气动舵和 RCS 控制[1,2]。在再入初期，RCS 是这类飞行器保持姿态稳定的唯一有效手段，合理的组合配置[3]和重构方式能够有效地降低飞行器对 RCS 规模的要求，提高系统可靠性。因此，展开 RCS 系统的冗余配置技术研究对优化总体方案、提高姿态控制效能、提高系统可靠性和经济性有重要意义。

RCS 的配置一般是指飞行器上配备的所有推力器的数量、大小、安装位置和方向等，其性能的好坏将直接影响控制算法的精度、能力、燃耗等性能指标。Servidia P A 和 Pena R S 等对航天器实现六自由度控制需要的最少推力器数目展开了探讨[4]。王敏等从推力器配置对误差的鲁棒性和燃耗出发，提出推力器配置的两个新性能指标——配置阵的最小奇异值和平均燃耗[5]。文献[6]从系统性能出发分析比较了几种航天器 RCS 配置结构的特性。对比分析现有推力器配置的方法，大多基于定性设计，思想简单、设计目标单一、易操作，但是缺乏定量分析，使用范围局限性强。因此需要寻求有效的设计方法以解决 RCS 配置定性分析的不确定和多优化目标难以协调的问题。

本文结合 RCS 系统的基本配置流程和一般性设计原则，提出了配置因素归一化量化的定量配置方法，并基于该优化方法研究了多约束指标优化下的 RCS 冗余配置技术，以解决目前 RCS 配置依赖于工程经验定性分析的局限性，完善 RCS 配置过程多目标优化难以协调的不足。

1 RCS 冗余配置问题

再入飞行器的 RCS 系统必须能提供完整的三轴控制力矩，并根据任务具有一定的冗余度。根据飞行器的飞行环境和自身特点，RCS 配置需要考虑控制效能、配置空间、气流扰动和热防护等问题。因此，RCS 冗余配置问题可描述为：综合考虑冗余度、燃料消耗、控制效率和羽流冲击影响、热流影响等技术指标和约束因素，选择 RCS 系统推力器在飞行器上的安装位置、数量和各推力器喷管的安装方向，使 RCS 系统满足众多约束条件限制，达到控制目标和性能需求，最后对基本配置方案进行迭代优化，直至找到综合指标最好的方案为止。

如何建立 RCS 配置的性能指标与配置方案中设计变量之间的关系，采用有效的优化方法找到综

收稿日期：2012-12-28

作者简介：常 晶(1988—)，女，西北工业大学硕士研究生，主要从事飞行器制导与控制的研究。

合指标最好的方案是冗余配置的关键问题。基于传统配置流程和基本原则,归一化量化影响因素,建立其与设计变量之间的数学模型,达到定量评估配置推力器方案是本文的重点工作。

2 RCS 量化寻优冗余配置方法

量化评估法是寻求 RCS 配置方案的主要影响因素对配置效果的影响规律,并通过数学模型描述其影响作用,用定量数学优化法使 RCS 系统在配置设计阶段就能实现某些主要因素和技术指标的最优化。从而将主要依据工程经验的配置问题转化为优化设计问题,突破现有配置方法主要依赖于工程经验的局限性,减少 RCS 配置设计阶段中盲目性和反复试凑性。

2.1 RCS 配置关键影响因素量化

1) 力臂大小

取配置位置的极限力臂,归一化量化如下

$$L_{Si} = \frac{L_{\max i}}{L_{\mathrm{ref}}} \tag{1}$$

式中,L_S 为归一化的量化力臂,$i = l,m,p$ 分别表示滚转、偏航、俯仰通道,$L_{\max i}$ 为选定配置部位上的三通道极限力臂,L_{ref} 为特征长度。

2) 热流因素量化

文献[7]研究表明锥形体外形飞行器机身热流分布与相对头部的轴向距离间的关系如下

$$s \uparrow \rightarrow Q_w \downarrow$$

因此,热流密度分布可归一化为如下的关于轴向距离的关系式

$$Q_w = \frac{k_Q}{1 + \bar{s}} \tag{2}$$

式中 k_Q 为加权系数,$\bar{s}$ 为归一化特征长度,头部端点为 0,尾部端点为 1。

3) 冗余度

系统的冗余度 R 是指系统仍能完成控制任务,允许推力器失效的最大数目。对于一般的 n 维控制任务:

最小结构要求推力器数目 N 为

$$N = n + 1 \tag{3}$$

如果要求冗余度为 R,则最小冗余结构的推力器数目 N 为

$$N = n + 1 + 2R \tag{4}$$

4) 力矩效率量化

假设推力器 i 的推力大小为 f_i,安装角向量 $\boldsymbol{\theta}$,则 N 个推力器的 RCS 系统产生的力矢量为 $f_T(f_i,\boldsymbol{\theta},N)$,其三轴力矩为 $[M_x(f_T)\ M_y(f_T)\ M_z(f_T)]$,令 $f_T = f_1 + f_2 + \cdots + f_N$ 表示单位时间内几台推力器产生的冲量和,则当前推力器产生各轴特定力矩的效率如下:

$$[K_{M_x}\quad K_{M_y}\quad K_{M_z}] = \left[\frac{M_x}{f_T}\quad \frac{M_y}{f_T}\quad \frac{M_z}{f_T}\right]$$

在给定推力器位置和安装数量时,RCS 的配置问题就转化为一个参数优化问题: 求安装角度 $\boldsymbol{\theta}$,使推力器产生各轴力矩的效率取得最大值。综合考虑各轴力矩,建立加权归一化模型

$$K_M = (w_1 K_{Mx} + w_2 K_{My} + w_3 K_{Mz})/N \tag{5}$$

式中,w_i 为加权系数。使得 $\frac{\partial K_M}{\partial \theta_i} = 0$,即可得到力矩最优的推力器安装角。

5) 燃料消耗

引入反映配置燃耗的性能指标,平均燃耗

$$I = \frac{1}{S_1}\int_{\mathrm{sphere}} f \cdot fuel\ \mathrm{d}s \tag{6}$$

I 是整个控制指令域的积分,其中,S_1 是指令域的广义表面积; f 反映指令分布情况的函数; $fuel$ 为下面模型解得目标函数值 J。

$$\begin{aligned} &\min \quad J = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} = \sum_{j=1}^{n} c_j t_j \\ &\text{s.t.} \quad \bar{\boldsymbol{A}}_s \boldsymbol{x} = \bar{\boldsymbol{u}} \quad x_i \geqslant 0 \end{aligned} \tag{7}$$

式中,J 表示分别点燃每个推力器 x_i 秒需要的总燃料消耗量[8],$\boldsymbol{x}$ 的分量是每个推力器的开火时间,$\boldsymbol{c}$ 的分量是指每个推力器的燃料流率,n 是推力器总个数; $\bar{\boldsymbol{A}}_s$ 是推力器配置矩阵 $\boldsymbol{A}$ 标准化后得到的矩阵,$\bar{\boldsymbol{u}}$ 是标准化的控制指令。

6) 鲁棒性

设推力器配置阵 $\boldsymbol{A}$,用 $\delta\boldsymbol{A}$ 表示干扰及推力器失效的加和,称配置阵所能承受的干扰及推力器故障的大小称为配置阵在 RCS 故障下保持可行的鲁棒性[5]。根据文献[5]中的引理和推论,$\sigma(\boldsymbol{A})$ 能从一定程度上表征导致配置阵 $\boldsymbol{A}$ 的秩减少,由可行变为不可行的最小不确定阵的大小尺度。故选择将配置阵的最小奇异值作为衡量配置阵对推力器故障及干扰鲁棒性的性能指标。

2.2 RCS 系统的综合量化性能指标

根据上述各量化指标的定义,在配置方案中,应尽量使热流影响较小; 一定数目的推力器下,冗余度

越多,力臂越大,推力器产生各轴的力矩效率越高;同时配置方案应满足燃料消耗小、控制能力高、鲁棒性好。

选取推力器配置综合性能评估指标 J 为各量化指标的函数

$$\boldsymbol{J} = f(\bar{L}_s, Q_{w_{\max}}, K_M, I, R, \sigma(\boldsymbol{A})) = \min \quad (8)$$

上述多约束因素量化综合指标为高维函数,求解目标值较难,对应 1) ~6),逐一分析归一化量化后的影响因素,设计时可根据下列情况进行简化:

1) 对某一固定飞行器的归一化极限力臂是一定的用常数 $\bar{L}$ 表示。

2) 根据热流密度分布与相对头部轴向距离的关系,推力器安装在飞行器尾部时,$Q_w = k_Q/2$。

3) 推力器配置的冗余度与推力器数量有关,一般由用户提出要求,用定值 R 表示。

综上,推力器配置方案的综合评估指标 J 可简化为关于 $K_M, \sigma(A), I$ 的优化函数。目标函数 J 用极小值表示,与 $K_M, \sigma(A)$ 成反比,与燃料消耗 I 成正比

$$\boldsymbol{J} = \min\left\{K' + \frac{\xi_1}{K_M} + \frac{\xi_2}{\sigma(A)} + \xi_3 \cdot I\right\} \quad (9)$$

式中,$\bar{L} + 0.5k_Q + R$ 是常值,K' 前两项由 RCS 系统在飞行器纵轴的安装位置决定,称为安装位置优化指标,$K_M, \sigma(A), I$ 由选用的推力器的性能决定,是推力器性能指标;ξ_1、ξ_2、ξ_3 分别是 RCS 系统的效率、鲁棒性和燃耗的权重函数。

基于量化综合评估指标,RCS 冗余配置问题转化为非线性规划的最优问题,以(9)式为规划目标,采用内点插值法搜索满足约束的最优 RCS 安装位置、推力器数量和安装角。应用指标 J 求解的配置方案满足鲁棒性强、效率高、燃料消耗小。

3　冗余配置案例设定

RCS 主要用于可重复使用运载器的初始再入段姿态控制,再入控制任务是确保冗余度为 2 的三通道姿态稳定控制,设计满足控制任务的最优推力器配置方案,验证量化寻优配置方法的有效性。

3.1　RCS 配置方案设计

1) 推力器位置

推力器的安装位置根据第 3 节中量化指标,遵循设计最优方法达到,即推力器安装在飞行器飞行器尾部,此时热流影响最小,并达到极限力臂(假设 $x_L = 1.8$),则

$$K' = \bar{L} + 0.5k_Q + R$$

2) 推力器数量

根据最小冗余结构的推力器数目 N 的计算公式知

$$N \geqslant 4 + 2R$$

为实现冗余度为 2 的分轴并联控制,在此选择推力器数目为 12。

3) 推力器安装方向

在推力器数目和安装位置确定的情况下,推力器的安装方向直接决定推力器配置矩阵,即影响推力器的力矩效率 K_M、燃料消耗 I 及鲁棒性 $\sigma(A)$。

假设推力器安装点即飞行器尾部纵向截面近似为椭圆,椭圆参数为($a = 250$ mm, $b = 180$ mm)。根据喷管对称安装原则,推力器的安装角分别为 θ_{1i}、θ_{2i}($\theta_i > 0, i = 1, 2, \cdots, 12$),各推力器的安装方向如图 1 所示。

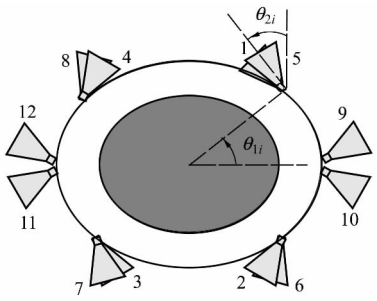

图 1　推力器安装方向示意图

根据极限力臂,则推力器安装力臂计算如下

$$y_L = |b^* \sin\theta_{1i}|, z_L = |a^* \cos\theta_{1i}| \quad (10)$$

则推力器力矩配置矩阵 $\boldsymbol{A}$ 为

$$\boldsymbol{A} = F\begin{bmatrix} m_{x1} & -m_{x2} & m_{x3} & -m_{x4} & \cdots & m_{x9} & -m_{x10} & m_{x11} & -m_{x12} \\ x_L\sin\theta_{21} & x_L\sin\theta_{21} & -x_L\sin\theta_{21} & -x_L\sin\theta_{21} & \cdots & x_L\sin\theta_{29} & x_L\sin\theta_{29} & -x_L\sin\theta_{29} & -x_L\sin\theta_{29} \\ x_L\cos\theta_{21} & -x_L\cos\theta_{21} & -x_L\cos\theta_{21} & x_L\cos\theta_{21} & \cdots & x_L\cos\theta_{29} & -x_L\cos\theta_{29} & -x_L\cos\theta_{29} & x_L\cos\theta_{29} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中，$m_{xi} = z_L\cos\theta_{2i} + y_L\sin\theta_{2i}$。

根据力矩需求分析取 $w_1 : w_2 : w_3 = I_{xx} : I_{yy} : 3I_{zz}$，并假设每个推力器喷管的燃料流率相等，用 c_0 表示。基于推力器配置综合性能指标，求解配置矩阵安装角的过程是非线性规划的过程，非线性规划问题的数学描述为

$$\boldsymbol{J} = \min\left\{K' + \frac{\xi_1}{K_M} + \frac{\xi_2}{\sigma(A)} + \xi_3 \cdot I\right\}$$
$$\text{s.t.} \quad 0 \leqslant \theta_{1i}、\theta_{2i} \leqslant 90° \tag{12}$$

式中

$$\begin{cases} I = \dfrac{1}{S_1}\displaystyle\int_{\text{sphere}} f \cdot fuel(\alpha,\beta,\gamma_v)\,\mathrm{d}s \\ \text{其中 } fule = \min c_0(t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_{11} - t_{12}) \\ \text{s.t.} \quad \boldsymbol{J}^{-1} \cdot \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{T} \cdot \boldsymbol{T}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} \gamma_{vc} \\ \beta_c \\ \alpha_c \end{bmatrix} \end{cases} \tag{13}$$

$$K_M = \frac{[2w_1 m_{xi} + 3.6w_2\sin\theta_{29} + 3.6w_3\cos\theta_{25}]}{12} \tag{14}$$

式中 $\boldsymbol{J}$ 是惯性张量，$\boldsymbol{T} = [t_1 \quad t_2 \quad \cdots t_{11} \quad t_{12}]$。

以力矩效率为主要设计指标，取 $\xi_1 = 0.5$，$\xi_2 = 0.25$，$\xi_3 = 0.25$，利用 MATLAB 中 Optimization Toolbox 的 fmincon 函数，采用罚函数法搜索得到安装角为

$$\theta_{11} = 0°, \theta_{15} = 12.03°, \theta_{19} = 12.02°$$
$$\theta_{12} = 16.37°, \theta_{25} = 16.42°, \theta_{59} = 16.41° \tag{15}$$

此时，归一化后的力矩效率 $K_M = 0.688$，最小奇异值 $\sigma(A) = 0.843$，燃料消耗 $I = 1.211$。

表1 推力器配置参数表

	θ_{1i}/(°)	θ_{2i}/(°)	M_x	M_y	M_z
1	0	16.37	0.24F	0.51F	1.73F
2	0	163.63	−0.24F	0.51F	−1.73F
3	0	−163.63	0.24F	−0.51F	−1.73F
4	0	−16.37	−0.24F	−0.51F	1.73F
5	12.03	16.42	0.245F	0.51F	1.73F
6	−12.03	163.58	−0.245F	0.51F	−1.73F
7	−167.97	−163.58	0.245F	−0.51F	−1.73F
8	167.97	−16.42	−0.245F	−0.51F	1.73F
9	12.02	16.41	0.245F	0.51F	1.73F
10	−12.02	163.59	−0.245F	0.51F	−1.73F
11	−167.98	−163.59	0.245F	−0.51F	−1.73F
12	167.98	−16.41	−0.245F	−0.51F	1.73F

综上步骤，依次完成了冗余度为2的RCS配置方案中推力器数量、安装位置及安装方向的设计。

需要说明的是，在进行配置方案设计过程中，并不能达到所有配置指标最优，是在可行解中求得某项最优，其它项较优。该方法也可通过计算各量化性能指标而评估不同的配置方案。

3.2 仿 真

用设计的RCS配置方案作为姿态控制执行机构，进行6DOF仿真。推力器的控制分配组合逻辑采用分轴和分档查询相结合的方式。推力器额定推力为400 N，控制指令攻角 α、侧滑角 β 和倾侧角 γ_v 如下图2、图3和图4所示。进一步考虑RCS故障情况下，采用基于组合逻辑检索的重构方法，控制指令跟踪结果。

由仿真曲线可知，无论完整配置下还是某两个推力器故障重构时，本文设计的RCS配置方案都能使姿态角很好的跟踪RLV初始再入段的指令曲线，无故障时控制精度高于两个推力器失效时。其鲁棒性在一定条件下能满足推力器故障，但是如果某些推力器出现故障，控制分配无可行解时，必须考虑控制律重构问题，而使得整个系统能达到期望性能指标。

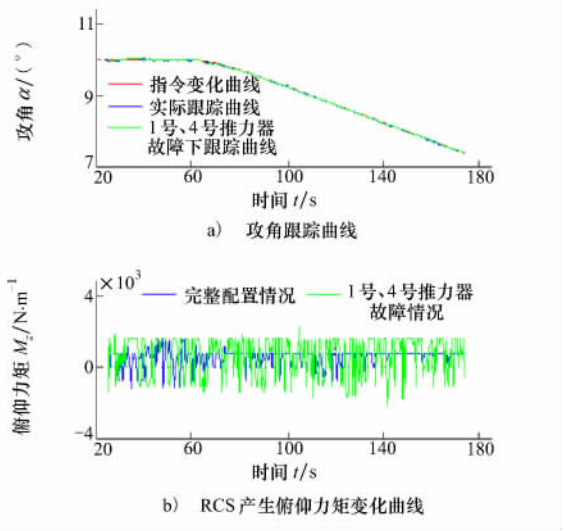

图2 俯仰方向姿态跟踪情况

RCS系统的燃料消耗量的大小可表示为 $m = \sum_i N_i \cdot t_i \cdot \dot{m}$，可以用推力器的总开火时间衡量各种配置方案的燃料消耗。分别对各典型推力器失效组合情况下姿态跟踪过程中的燃料消耗、最大误差如表2所示。

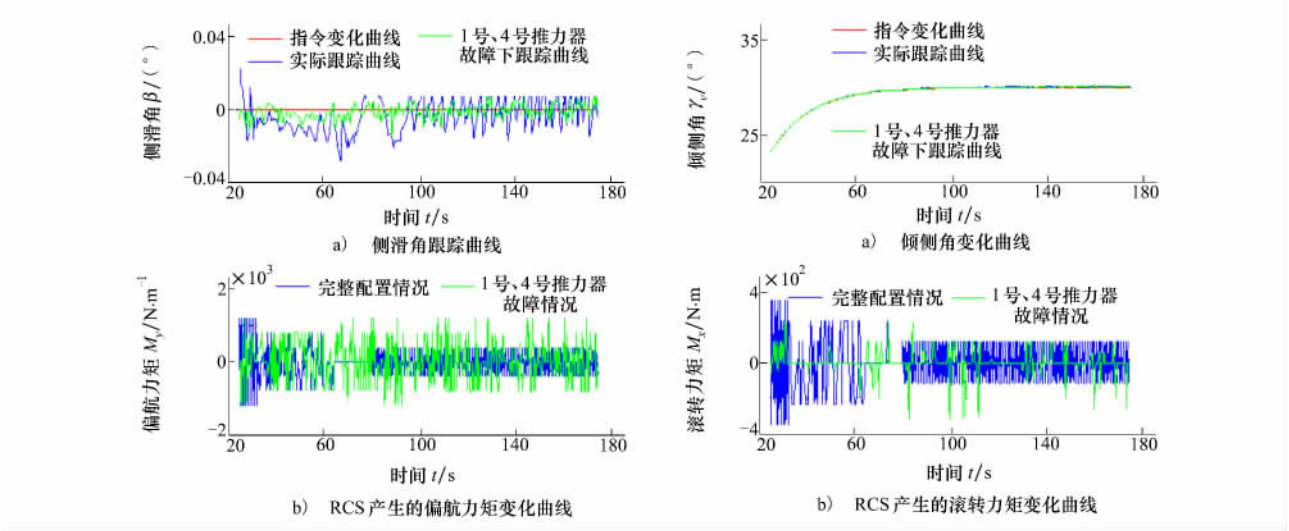

图 3　横向通路姿态跟踪情况　　图 4　侧向通路姿态跟踪情况

表 2　推力器故障的控制情况

失效推力器		类别		
		攻角	侧滑	倾侧
无	最大误差/(°)	0. 0508	0. 0285	0. 065
	平均误差/(°)	0. 0128	0. 0085	0. 0262
	开火时间/s	309. 19		
1 号	最大误差/(°)	0. 097	0. 0323	0. 0763
	平均误差/(°)	0. 0162	0. 0086	0. 0262
	开火时间/s	500. 15		
9 号	最大误差/(°)	0. 0508	0. 0285	0. 065
	平均误差/(°)	0. 0128	0. 0085	0. 0262
	开火时间/s	309. 19		
1、3 号	最大误差/(°)	0. 1178	0. 0138	0. 0514
	平均误差/(°)	0. 022	0. 0034	0. 0165
	开火时间/s	500. 065		
1、10 号	最大误差/(°)	0. 1482	0. 017	0. 067
	平均误差/(°)	0. 0288	0. 0039	0. 0188
	开火时间/s	448. 12		
9、10 号	最大误差/(°)	0. 0835	0. 012	0. 0671
	平均误差/(°)	0. 0453	0. 0033	0. 018
	开火时间/s	453. 24		

上述表中最大误差和平均误差按 RCS 工作段攻角、侧滑、倾侧跟踪曲线上的最大误差和稳定跟踪阶段的误差计算的，并非系统阶跃响应下的稳态误差。最大误差小于 0. 15°，远高于工程精度，说明控制精度较高。通过仿真验证结果可知，该配置方案允许任意一个或两个推力器的失效。

4　结　论

本文在传统 RCS 系统的设计原则的基础上，针对 RLV 的特点，将 RCS 配置指标逐一量化处理，综合成性能指标函数，进而将主要依据工程经验和反复试凑的 RCS 冗余配置问题转化为一个综合指标优化问题来设计，形成了一套完整的基于量化评估的 RCS 冗余配置方案设计方法，并以某 RLV 的 RCS 系统设计为例，仿真验证了该方法的有效性。取得如下研究结论:

1) 本文方法是一种量化设计方法，易于进行不同设计方案间的定量分析与对比。

2) 本文方法具有明确物理意义的综合优化指标函数，基于实现特定指标的 RCS 冗余配置方案优化。

3) 本文方法不需要反复试凑，且易于工程化。

参考文献:

[1] 张 阳,黎科峰,张庆振,任 章. 反作用控制系统在RLV再入复合控制中的研究. 航天控制,2008,26(3):19-24
Zhang Yang, Li Kefeng, Zhang Qingzhen, Ren Zhang. Reaction Control System of RLV Blended Control in Re-Entry Mode. Aerospace Control, 2008, 26(3): 19-24 (in Chinese)

[2] Randall E, Bailey E, Bruce Jackson, Goodrich K H. Initial Investigation of Reaction Control System Design on Spacecraft Handling Qualities for Earth Orbit Docking. AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, USA, 2008, 18-21

[3] Roy K Tsugawa, Redondo Beach. Thruster Configurations for Maneuvering Heavy Payloads. AlAA Space Programs and Technologies Conference, USA, 1992, 24-27

[4] Pablo A Servidia, Ricardo S. Thruster Design for Position/Attitude Control of Spacecraft. Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1172-1180

[5] 王 敏,解永春. 航天器推力器配置的两项新性能指标. 宇航学报,2011,32(6):1298-1304
Wang Min, Xie Yongchun. New Performance Indices for the Performance Analysis of the Spacecraft Thruster Configurations. Journal of Astronautics, 2011, 32(6): 1298-1304 (in Chinese)

[6] Mark Jackson, Rodolfo Gonzalez. Orion Orbit Reaction Control Assessment. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exihibit, Hilton Head, South Carolina, USA, 2007, 20-23

[7] 沈遐龄. 航天飞机气动加热计算. 北京航空航天大学学报,1988,24(2):189-192
Shen XiaLing. Calculating Method of Aerodynamic Heating. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronauties, 1988, 24(2): 189-192 (in Chinese)

An Effective Method for Redundancy Configuration of RCS (Reaction Control System)

Chang Jing, Zhou Jun, Hu Weijun

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Current redundancy configuration methods of RLV (reusable launch vehicle) were all restrainedly qualitative analysis that relied on experience and trial-and-error. We, aiming at a straight forward solution, proposed a redundancy configuration method, believed to be effective and based on multi-constraint factor quantification and multi-objective optimization, to enhance RCS efficiency. The various factors correlated with RCS configuration were quantified in the normalization way according to their physical principles in this method, including installation location, direction, quantity and system performance, and integrated into a quantitative assessment of the indicator function. Quantitative mathematical optimal method was used to convert the configuration issue into an ordinary nonlinear programming problem. On the basis of the work above, a configuration case with the redundancy degree of 2 was designed to verify the effectiveness and reliability of the method, and to indicate that this configuration method can be used for quantification optimization in the design process.

Key words: control system applications, design, efficiency, launch vehicles, multiobjective optimization, nonlinear programming, redundancy, reliability; influencing factor quantification, integrated evaluation, RSC(Reaction Control System), redundancy configuration of RCS, quantitative assessment