

时间最优与模糊PID控制在双光楔扫描中的应用

孙辉辉, 冉承平, 时光煜

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为实现视轴变化、扩大探测视场, 双光楔扫描需要进行大角度跳转。提出一种时间最优与模糊PID(比例-积分-微分)控制器相结合的控制策略, 时间最优控制用于快速消除大角度偏差, 模糊PID位置控制保证到位后精度高、超调量小, 从而提高系统的静态和动态性能。试验结果表明, 控制系统可以实现双光楔的快速定位, 提高抗干扰能力, 有较强的鲁棒性; 同时由于操作性强, 有较高的应用和推广价值。

关键词: 机载光电探测设备; 双光楔; 时间最优控制; 模糊PID控制

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0084-05

Application of Time-Optimal and Fuzzy PID Control in Double Wedge Prism Scanning

SUN Huihui, RAN Chengping, SHI Guangyu

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to change the line of sight and enlarge the detection scope, the double wedge prism scanning system requires to rotate a large angle rapidly. A control strategy combining time-optimal control with fuzzy PID (Proportional Integral Differential) control was proposed. The time-optimal control was used for eliminating the large angle deviation in the shortest time; and fuzzy PID control, which has high precision and small overshoot, was used for improving the static and dynamic performance of the system. Experimental results show that the controlled system has high performance robustness, which can realize fast and accurate positioning on the double wedge prism and improve the anti-jamming capability. At the same time, the control scheme can be extended to apply to other servo systems with the characteristics easy to handle.

Key words: airborne EO system; double wedge prism; time-optimal control; fuzzy PID control

0 引言

机载光电探测设备常用的离轴实现形式, 有反射镜扫描(平面反射镜、镜鼓扫描等)和双光楔扫描。

双光楔是采用材料和形状完全相同的两块相互靠近的光楔组成的系统。双光楔扫描利用光楔对入射光线产生的偏折原理, 通过控制光楔间的相对旋转实现视轴偏移, 具有机械上运动平稳、结构紧凑、扫描效率高、易于制造等优点, 已在机载类光电探测设备中得到了广泛应用^[1], 普遍采用的是PID控制方法。

1 建立双光楔扫描方程

为分析计算双光楔相对转角和视轴偏角的函数关

系, 在图1所示的坐标系基础上建立双光楔扫描方程。

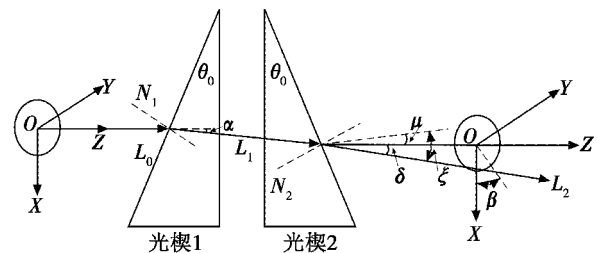


图1 双光楔扫描方程示意图

Fig.1 The schematic of double wedge prism scanning equation

设OZ轴为0位光线, 图中: δ 为光线 L_2 与OZ轴夹角; β 为光线 L_2 在XOY平面投影与X轴夹角; θ_0 为光楔楔角。

光线 L_1 与OZ轴的夹角 α 为

$$\alpha = \theta_0 - \arcsin(\sin \theta_0 / n) \quad (1)$$

式中, n 是光楔材料的折射率。

根据折射定律

$$\begin{cases} n_0 L_0 \times N_1 = n_1 L_1 \times N_1 \\ n_1 L_1 \times N_2 = n_0 L_2 \times N_2 \end{cases} \quad (2)$$

得光楔1、2的瞬时转角 ϕ_1 、 ϕ_2 为

$$\begin{cases} \phi_1 = -\arccos\left(\frac{b^2 + c^2 + d^2 - a^2}{2b\sqrt{c^2 + d^2}}\right) + \alpha_1 \\ \phi_2 = \arccos\left(\frac{b^2 - c^2 - d^2 - a^2}{2a\sqrt{c^2 + d^2}}\right) + \alpha_1 \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} a = \sin \theta_0 (\cos \delta - n \cos \alpha) \\ b = n \cos \theta_0 \sin \alpha \\ c = \sin \delta \sin \beta \cos \theta_0 \\ d = \sin \delta \cos \beta \cos \theta_0 \\ \alpha_1 = \arcsin(c/\sqrt{c^2 + d^2}) \end{cases} \quad (4)$$

光线 L_2 绕 OX 轴转动方位角 μ , 光线 L_2 绕 OY 轴转动俯仰角 ξ , 则有如下关系

$$\begin{cases} \cos \mu \sin \xi = \sin \delta \cos \beta \\ \sin \mu = \sin \delta \sin \beta \\ \cos \delta = \cos \mu \cos \xi \end{cases} \quad (5)$$

可得

$$\begin{cases} \delta = \arccos(\cos \mu \cos \xi) \\ \beta = \arcsin\left(\frac{\sin \mu}{\sin \delta}\right) \end{cases} \quad (6)$$

光楔对光束的导向范围是一个关于 OZ 轴旋转对称的圆锥立体角, 即折射光线只能位于这个圆锥立体角内。最大导向角 δ_{\max} 的大小取决于光楔楔角 θ_0 和材料的折射率 n , 可表示为

$$\delta_{\max} = 2(n-1)\theta_0 \quad (7)$$

2 模型建立

双光楔扫描采用伺服电机通过齿轮减速器拖动, 光电编码器测量光楔的角度和角速度信号, 其数学模型为^[2-3]

$$p(T_M p + 1)\theta = K_M U_a - K_f M_f \quad (8)$$

式中: T_M 为电机的机电时间常数; K_M, K_f 分别为输入电压 U_a 和等效负载力矩 M_f 对电机轴角速度 $\omega = p\theta$ 的传递函数。

定义状态变量: $\begin{cases} x_1(t) = y(t) \\ x_2(t) = \dot{y}(t) \end{cases}$, 令 $\frac{K_M U_a}{T_M} = u(t)$,

$\frac{K_f M_f}{T_M} = M, \frac{1}{T_M} = a, \frac{K_M}{T_M} = b, M_f = 0$, 则

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u(t) \quad (9)$$

3 控制方法

双光楔的相对转角与视轴角为非线性函数, 在视轴变化方位 $\pm 21^\circ$ 、俯仰 $\pm 18^\circ$ 时, 按式(3)、式(5)得光楔的最大跳转角度为 135.7° ^[4]。单纯的PID控制的结果是调节时间长、超调量大、控制效率低, 且参数的选取比较困难, 难以满足系统要求。

为此, 采用时间最优与模糊PID控制器相结合的双模控制算法, 在大角度跳转时, 采用时间最优控制以提高系统的动态性能, 到位后再采用模糊PID位置控制, 以提高系统的控制精度, 减小系统的超调量, 使系统获得较为理想的静态和动态性能指标。控制系统结构如图2所示, 其控制规律为

$$\begin{cases} \text{时间最优控制, } |e_{(k)}| \geq \varepsilon \\ \text{模糊PID控制, } |e_{(k)}| < \varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中, 阈值 $\varepsilon > 0$ 。当偏差绝对值大于角度差设定值 ε 时, 采用时间最优控制器; 当偏差绝对值小于角度差设定值 ε 时, 实施模糊PID控制。

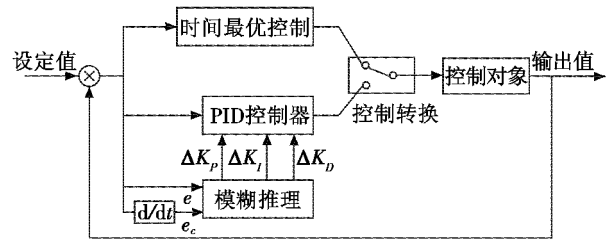


图2 控制系统结构图

Fig. 2 The structure of control system

3.1 时间最优控制

3.1.1 时间最优控制理论^[5-9]

时间最优控制由 Pontryagin 于 1956 年提出, 研究满足约束条件下获得允许控制的方法, 用最大值原理设计出控制变量只在 $|u(t)| \leq 1$ 范围内取值的最优控制系统。

对线性定常系统, 其状态完全可控, 状态方程为 $\dot{x}(t) = Ax + Bu(t)$, 系统从已知初态 $x(t_0) = x_0$ 转移到终止状态 $x(t_f) = 0$, 使性能泛函数达到最小值, 即

$$J[u(\cdot)] = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (11)$$

应用时间最优控制理论, 则控制作用 $u(t) \leq 1$, 最优控制律为

$$u^*(t) = -\text{sgn}\left\{B^T e^{A^T(t-t_f)} \mu\right\} = \text{sgn}\left\{\frac{b}{a}(a - e^{-a(t-t_f)})\mu_1 + be^{-a(t-t_f)}\mu_2\right\} \quad (12)$$

式中: $a = \frac{1}{T_M}; b = \frac{K_M}{T_M}$ 。

根据 μ_1, μ_2 的不同取值,式(12)中 $u^*(t)$ 有 4 种情况: $\{+1\}, \{-1\}, \{+1, -1\}, \{-1, +1\}$ 。

3.1.2 最优控制求取

根据双光楔扫描的实际工程需要,只取 $u^*(t) = \pm 1$ 两个值,并依照一定的法则加以切换,使系统从一个初始状态转到另一个状态所经历的过渡时间最短。这种最优切换系统也称为 Bang-Bang 系统。

令 $u^*(t) = 1$, 状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = -x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = -ax_2(t) + b \end{cases} \quad (13)$$

$x_1(0) = x_{10}, x_2(0) = x_{20}$, 求得

$$\begin{cases} x_1(t) = x_{10} - \frac{ax_{20} - b}{a^2}(e^{-at} - 1) + \frac{b}{a}t \\ x_2(t) = (x_{20} - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} \end{cases} \quad (14)$$

根据研究的对象,只讨论引向原点的各一条曲线的半支曲线,取 $x_{10} = x_{20} = 0$, 消去式(14)中的 t 得

$$x_1(t) = -\frac{b}{a^2} \ln \frac{ax_2(t) - b}{-b} - \frac{1}{a}x_2(t), \quad x_2(t) \geq 0 \quad (15)$$

称为 r_+ 。

同理,另半支曲线为

$$x_1(t) = \frac{b}{a^2} \ln \frac{ax_2(t) + b}{b} - \frac{1}{a}x_2(t), \quad x_2(t) \leq 0 \quad (16)$$

称为 r_- 。

将式(15)、式(16)的曲线 r_+, r_- 合并为最优开关曲线 r 。曲线 r 将状态空间分成 R_+ 和 R_- 两区域,区域 R_+ 中 $u^*(t) = 1$, 为 r 的左下半部分;区域 R_- 中 $u^*(t) = -1$, 为 r 的右上半部分,如图 3 所示。

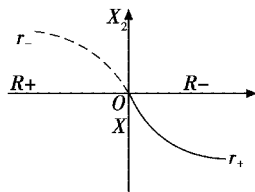


图 3 最优开关曲线

Fig. 3 Optimal switching curve

对双光楔扫描控制系统而言,若初始状态在 R_+ 区域,状态将沿 $u(t) = 1$ 的轨迹运动,直到遇到 r_- , 然后沿开关曲线运动到状态原点;若初始状态在 R_- 区域,状态将沿 $u(t) = -1$ 的轨迹运动,直到遇到 r_+ , 然后沿开关曲线运动到状态原点。

由此得到最优控制满足如下规律:

$$u^*(t) = \begin{cases} 1, & (x_1, x_2) \in r_+ \cup R_+ \\ -1, & (x_1, x_2) \in r_- \cup R_- \end{cases} \quad (17)$$

必须指出,以上分析只是在状态变量 (x_1, x_2) 无约束时才正确,实际系统的速度 x_2 是受限制的。考虑负

载的阻力矩,最优控制阈值曲线如图 4 所示。

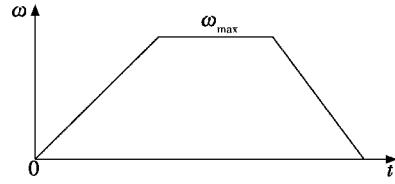


图 4 最优控制阈值曲线

Fig. 4 The threshold curve of optimal control

如图 4 所示,系统的速度分 3 段控制:首先,光楔以最大可能的加速度加速运动;当电机输出力矩与负载力矩相等,系统限速切换,光楔以最大速度保持匀速运动;系统状态到达切换点以后,从最大速度减至零速。

3.2 模糊 PID 控制算法

常规的 PID 控制器凭借其算法简单、易于实现和可靠性高,在工业控制中仍占主导地位。模糊 PID 控制器是近年来迅速发展的一种新型控制器,利用模糊控制的快速响应和超调量小,以及 PID 控制精度高的特点提高系统的性能,它不依赖于系统精确的数学模型,具有很强的适应性。

模糊 PID 控制器以误差 e 和偏差变化率 e_c 作为输入,根据系统偏差的大小、方向以及变换等特征,通过模糊推理做出相应决策,自动调整 PID 的比例、积分和微分系数。如图 5 所示。

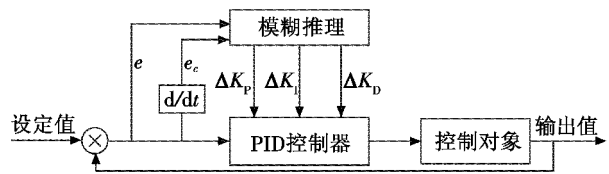


图 5 模糊 PID 控制系统框图

Fig. 5 The block diagram of fuzzy PID control system

模糊 PID 控制器调整参数计算式为

$$\begin{cases} K_p = K_p' + \Delta K_p \\ K_i = K_i' + \Delta K_i \\ K_d = K_d' + \Delta K_d \end{cases} \quad (18)$$

式中: K_p', K_i', K_d' 为初始设定的 PID 参数; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 为模糊控制器的输出,可以根据被控对象的状态自适应 3 个控制参数的值。

取 $e, e_c, \Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 模糊集合的领域均为 $(-6, -5, \dots, 0, \dots, 5, 6)$, 语言变量取为 $\{PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB\}$, 隶属度函数形状取用三角形。

根据系统的控制规律,通过反复的试验验证,建立 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 三个参数分别整定的模糊控制表,如表 1~表 3 所示。

根据模糊控制规则表,应用模糊推理合成规则,计算出模糊控制器的模糊控制决策表,其中模糊推理采用最大-最小合成法,清晰化采用加权平均法,得到相应

的 K_p 、 K_i 、 K_d 三个控制表。本文不再作详细论述。

表1 ΔK_p 的模糊规则

Table 1 Fuzzy rules of ΔK_p

ΔK_p	e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
	ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZE	ZE	NS	NM	NM	NB	NB

表2 ΔK_i 的模糊规则

Table 2 Fuzzy rules of ΔK_i

ΔK_i	e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
e	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	PS
	NS	NB	NM	NS	PS	ZE	PS	PM
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	NS	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表3 ΔK_d 的模糊规则

Table 3 Fuzzy rules of ΔK_d

ΔK_d	e_c							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
e	NB	NS	NS	NB	NB	NS	NS	NS
	NM	NS	NS	NB	NB	NS	NS	ZE
	NS	ZE	NS	NS	NB	NS	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PM	NS	NS	NS	NS	NS	PB	PB
	PB	NS	NS	NS	NS	NS	NS	PB

4 系统设计及仿真结果^[10-12]

对沟楔扫描控制回路流程如图6所示。首先根据载机的控制指令,确定视轴的偏转角度,根据式(5)、式(6)进行矢量变换,实现从 (μ, ξ) 到 (δ, β) 的变换,接下来将 (δ, β) 带入式(3)、式(4)中求解出光楔的转动角度 (ϕ_1, ϕ_2) ;然后采用最优控制算法分别控制两个光楔运动,同时,为提高系统实际运行时的平稳性和避免出现大超调,控制程序中不断调整最优算法设定的加速度,使之与负载实际加速度大小相适应;若指令和实际角度差值绝对值小于 ε ,则实施模糊PID控制。

仿真实验中选取光楔的折射率为 $n = 3.4246$,光楔楔角 $\theta_0 = 5.2^\circ$,采用前面给出的综合控制规律,光楔扫描控制回路初始状态为 $(0^\circ, 0^\circ/s)$,在0.14s跳转到 135.7° ;到位后还有50 mrad误差,切换为模糊PID控制,在0.05s内稳态精度达到0.1 mrad,如图

7~图9所示。

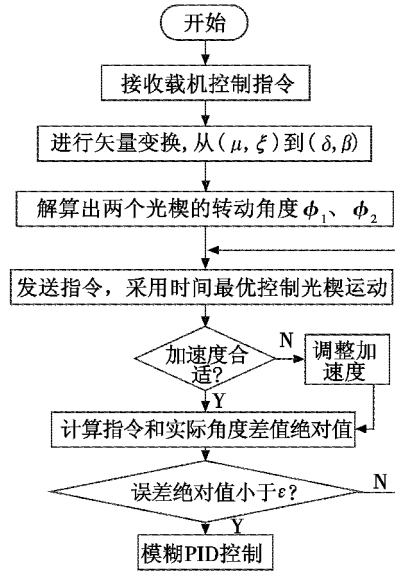


图6 双光楔扫描控制回路流程

Fig.6 The control circuit flow of double wedge prism scanning

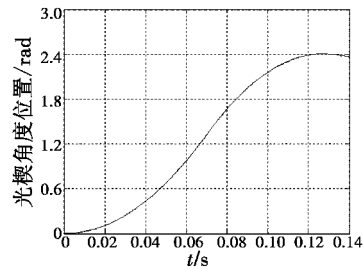


图7 光楔时间最优控制运动曲线

Fig.7 The motion curve of time-optimal control of wedge prism

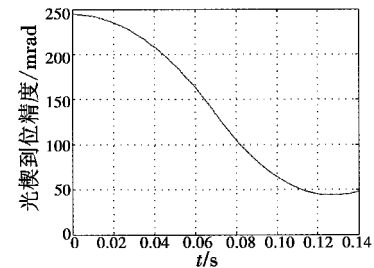


图8 光楔时间最优控制到位精度曲线

Fig.8 The precision curve in place of wedge prism time-optimal control

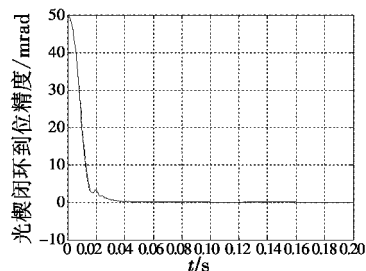


图9 光楔模糊PID到位精度曲线

Fig.9 The precision curve in place of wedge prism fuzzy PID control

仿真结果表明,时间最优控制很好地满足系统快速性的要求,达到阶跃过程最小化,结合模糊 PID 控制提高系统控制精度和自适应能力,从而获得较为满意的控制效果。

5 结束语

本文从双光楔扫描系统的实际特点出发,采用时间最优控制与模糊 PID 控制器相结合的控制策略,时间最优控制对系统的初期进行控制,快速消除大的偏差,到达跳转位置后,要求系统的精度高、超调小、动态误差小,模糊 PID 控制器能够很好地完成这一任务。最后,通过仿真试验证明该算法是正确和可行的。

参 考 文 献

- [1] 郁道银,谈恒英. 光学工程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2008.
- [3] 李友善. 自动控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
- [4] 时光煜,李明月,孙辉辉. 旋转折射光楔对控制模型在机载光电探测设备中的应用分析[J]. 电光与控制,2011,18(12):52-55.
- [5] WORKMAN M L. Adaptive proximate time optimal servomechanisms [D]. Stanford:Stanford University,1987.
- [6] 吴沧浦. 最优控制的理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [7] 李凤俐. 时间最优控制理论在雷达伺服系统中的应用[J]. 测控技术,2008,27(6):47-49.
- [8] 陈春红,武亚平,李军显. 雷达导引头最优控制问题研究[J]. 导弹与航天运载技术,2010(6):38-41.
- [9] 程丽丽,武玉强. 有限时间收敛控制与时间最优控制性能指标分析[J]. 曲阜师范大学学报,2007,33(3):19-24.
- [10] 诸静. 模糊控制原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [11] 陶永华. 新型 PID 控制及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [12] 何华锋,胡昌华,代延民. 一种自适应模糊 PID 控制器应用仿真[J]. 电光与控制,2006,13(1):41-44.

(上接第 72 页)

由图 7 分析可知,在无控状态下导弹的力系数比有控状态下的更大,说明导弹的运动更加剧烈,这一点可以从图 9 的静压系数等值线中无控比有控静压系数大,并且导弹周围静压系数梯度也更大得到验证。

从图 8 可以看出,采用控制方法使得导弹的俯仰角分布比较平滑,呈现出幅值快速衰减的过程,从舵偏角的时间曲线来看,它随着弹体俯仰角的变化而变化的跟随性很好,这对于内埋导弹脱离内埋舱和载机干扰流场的初始运动阶段的稳定性是非常有利的,表明协同仿真方法的有效性和导弹控制的必要性。

4 结论

本文针对内埋式导弹发射初始弹道精确模拟和控制的问题,结合 Fluent 和 Simulink 各自的功能,利用 Fluent 的 Journal 文件和 Simulink 的 S 函数,通过共享数据文件的方式实现了两者的数据传递,建立了并行协同仿真平台。在模拟仿真中,Fluent 准确计算内埋舱的流场参数和导弹的气动参数,Simulink 则完成舵面控制系统的仿真,其输出作为 Fluent 动网格模型的边界条件。仿真结果表明,用协同仿真方法处理内埋式导弹有控发射这类带控制的气动与运动紧耦合问题是可行的。

参 考 文 献

- [1] 吴继飞,罗新福,范召林. 内埋式弹舱流场特性及武器分离特性改进措施[J]. 航空学报,2009(30):1840-1845.
- [2] 张晓东,张培林,傅建平,等. 基于 CFD 与协同仿真的火炮后坐分析计算[J]. 弹道学报,2010(3):30-34.
- [3] 谢海斌,张代兵,沈林成. 基于 Matlab/Simulink 与 Fluent 的协同仿真方法研究[J]. 系统仿真学报,2007,19(8):1824-1827.
- [4] 鲍文,李伟鹏,常军涛,等. 基于 Fluent/Matlab 接口的分布参数系统闭环控制仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(11):2851-2858.
- [5] 贺明艳,周苏,黄自萍,等. 基于 Simulink/Fluent 的 PEM-FC 系统的协同仿真[J]. 系统仿真学报,2011,23(1):38-43.
- [6] Fluent Inc. Fluent 6.2 UDF Manual[M]. Lebanon, USA: Fluent Inc., 2005:1. 12-1. 14.
- [7] JOHNSON R A, STANEK M J, GROVE J E. Store separation trajectory deviation due to unsteady weapons bay aerodynamics[C]//The 46th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 7-10. January 2008, Reno, Nevada, AIAA 2008-188:1-15.
- [8] 苟永杰. 机弹分离数值仿真研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [9] NICHOLS R H, DENNY A G. Numerical simulation of a store in controlled separation[C]//17th Applied Aerodynamics Conference, June 28-July 1, 1999: AIAA99-3128.
- [10] 毕开波,王晓东,刘智平. 飞行器制导与控制及其 Matlab 仿真技术[M]. 北京:国防工业出版社,2009.

- [1] 吴继飞,罗新福,范召林. 内埋式弹舱流场特性及武器