

并行计算在垂直发射火箭弹转弯过程中的应用^{*}

秦小丽¹, 林德福¹, 陈国光²

(1 北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081; 2 中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要:火箭弹垂直发射转弯过程是非线性动力学过程, 为解决巨型规模的最优弹道解算问题, 研究了分布式并行计算方法, 建立了最优弹道的并行求解模型, 研制了专用仿真软件。仿真分析结果表明: 在满足一定的参数精度要求的情况下, 最优控制弹道问题具有极好的并行性, 分布式并行计算可显著提高计算效率, 问题的求解时间随并行机节点数的增加而成比例的缩短。

关键词:垂直发射; 并行计算; 弹道优化

中图分类号: TJ013 **文献标志码:** A

The Application of the Parallel Computation in the Process of the Rocket Ammunition Vertical Launch

QIN Xiaoli¹, LIN Defu¹, CHEN Guoguang²

(1 School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2 School of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The swerve of the vertical launch of rocket ammunition is a non-linear dynamic process. To solve the giant-scale optimum problem, the distributing parallel computation is researched, the parallel solving model of the optimum trajectory is established and the special simulation software is developed. The simulation analytical results demonstrate that distributing parallel computation can increase significantly the computing efficiency with the definite precision range of the parameters because the controlling trajectory has the extreme parallelism. The computing time is proportionally shortened with the increase of the node number of the parallel machine.

Keywords: vertical launch; parallel computation; trajectory optimum

最佳途径。

0 引言

近年来, 由于科学技术的进步与发展, 垂直发射已成为现代导弹的发射主流。与倾斜发射方式相比, 垂直发射方式具有空中快速转弯, 反应能力好; 装弹量大, 火力强, 全方位发射, 无发射盲区, 发射结构简单, 工作可靠, 生存力强; 有利于模块化、通用化设计; 成本低等优点。这些特点决定了垂直发射将是发射方式的必然选择。PAC-3 多次成功地发射试验表明, 美国在该项技术上已经相当成熟和完善。而在国内, 由于技术滞后等原因, 还鲜有这方面的探讨。在常规弹药中采用高新技术, 研究简易控制弹药、弹道修正弹药、简易制导弹药是提高武器系统效费比的

1 火箭弹垂直发射转弯系统的概念及构成

由测量元件作为系统的敏感元件, 测量火箭纵轴的运动参数, 测量元件输出的信号(也就是此时弹体姿态, 运动参数)与另外的测量元件测到的来自目标方向的信号形成一个偏差, 把这个偏差信号送给信号提取、滤波、放大电路, 此电路作为姿态控制系统的指令生成器, 驱动执行机构运动, 由执行机构形成对火箭弹体的控制力。

这样由测量元件、指令生成器、执行机构、火箭弹体组成了一个闭合的反馈控制回路。

^{*} 收稿日期: 2009-03-12

作者简介: 秦小丽(1979-), 女, 山西人, 博士研究生, 研究方向: 飞行器设计。

2 优化模型的建立

假设 $\psi(t)$ 为垂直发射转弯段理想姿态角变化值, 考虑到垂直发射火箭弹转弯弹道过程的物理稳定性、平缓性, 且 $\psi(t)$ 应具有平滑性质, 可将 $\psi(t)$ 函数描述为一斜率为 k 的直线和 n 个正弦函数曲线的叠加。即:

$$\psi(t) = k(t - T_0) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i(t - T_0) + \varphi_{0i}) \quad (1)$$

综合分析影响垂直发射火箭弹转弯的主要弹道因素, 并考虑到上式, 转弯段姿态角随时间的变化规律可用下式表示:

$$\psi(t) = f(T_0, k, T, (A_i, \omega_i, \varphi_{0i}, i = 1, 2, 3, \dots, n)) \quad (2)$$

为了便于表示各因素对 $\psi(t)$ 的影响程度, 对各参数进行归一化处理。

1) 起控时间 T_0 的归一化

$$T_0 = T_0^* T \quad (0 \leq T_0^* \leq 1)$$

式中: T 为火箭弹完成转弯所需飞行时间。

2) $\psi(t)$ 的基线斜率的归一化

$$k = k^* k_c \quad (0 \leq k^* \leq 1)$$

式中: $k_c = \frac{|\psi^*|}{T}$; $|\psi^*|$ 为控制段中 $\psi(t)$ 变化范围的值。

3) 幅值 A_i 的归一化

$$A_i = A_i^* \cdot |1.5\psi^*| \quad (0 \leq A_i^* \leq 1)$$

4) 频率 ω_i 的归一化

$$\omega_i = \omega_i^* \cdot \omega_n \quad (0 \leq \omega_i^* \leq 1)$$

式中: $\omega_n = \frac{2\pi}{T}$, 与控制时间 T 对应。

5) 初相位 φ_{0i} 的归一化

$$\varphi_{0i} = \varphi_{0i}^* \cdot \varphi_0 \quad (0 \leq \varphi_{0i}^* \leq 1)$$

式中: $\varphi_0 = \pi$ 。

6) 时间 T 的归一化

$$t = 2T_g \quad (0 < T_g \leq 1)$$

经归一化处理后, 姿态角随时间的控制规律可表示为:

$$\psi(t) = k^* \frac{|\psi^*|}{2T_g} t - k^* T_0^* \psi^* +$$

$$|\psi^*| \sum_{i=1}^n A_i^* \sin(\omega_i^* \frac{\pi}{T_g} t - 2\pi\omega_i^* T_0^* + \varphi_{0i}^* \pi) \quad (3)$$

若用 n 阶正弦函数模拟偏转角随时间的变化规律, 则上式中共有 $N = 3 + 3n$ 个参数。

将 $\psi(t)$ 代入火箭弹动力学方程, 至此, 垂直发射火箭弹转弯的参数优化和变分的复杂问题转化为多参数优化问题。

式(3)是多参数非线性优化问题。求解过程中需计算巨量的弹道方案。用并行机群是解决该大规模计算的有效方法。

3 并行计算的产生及特点

科学计算的发展史表明, 计算方法的设计、研究与不断革新是与计算机技术的进步相互影响、相互促进的, 是计算技术的一个重要组成部分。对于并行处理脚超级计算环境而言, 并行算法与并行计算机硬件、软件三者并存, 缺一不可, 共同构成了超级计算技术。并行数值方法已成为研制高性能并行计算程序的关键技术之一, 是高效并行计算的必由之路; 同时, 并行数值方法是一个崭新的学术分支, 它丰富了传统计算方法的研究内容, 成为计算数学的重要研究方向。

用低成本 PC 机进行分布式计算可显著提高计算效率。

4 并行计算在火箭弹转弯过程中的应用

参数优化方法有很多种, 为求解垂直发射火箭弹转弯弹道的最优化问题, 文中采用随机方向搜索法。随机方向搜索法的特点是计算量大, 计算模型简单。针对计算量大的问题, 采用分布式并行计算方法处理。

记初始设计向量为:

$$D_0 = \begin{bmatrix} T_0^* \\ K^* \\ A_i^* \\ \omega_i^* \\ \varphi_{0i}^* \\ T_g \end{bmatrix}_{(3+3n) \times 1 = N \times 1}$$

类似地, 定义以下变量:

$[D_0]$: 初始设计变量;

$[D]$: 设计变量;

$[\Delta D]$: 设计变量增量;

$[D^*]$: 最优化的设计变量;

ψ^* : 需要偏转的角度;

n_p : 参与计算的计算机数。

弹道最优化问题的具体求解过程为:

1) 将 $0^\#$ 进程上的 $[D_0]$ 广播给所有进程, 各进程分别计算一条弹道, 得到初始设计变量 $[D_0]$ 及其对应的初始偏转角 ψ_0 , 初始控制力 F_0 。每个进程上得到的结果完全相同。

2) 将 $0^\#$ 进程的 $[D_0]$ 及 F_0 广播给所有进程, 作为所有进程优化计算的初始参考值。

3) 各进程计算过程:

① 各进程分别产生 $(-0.5, 0.5)$ 上的均布随机数, 形成设计变量的增量 $[\Delta D]$ 。若为每个设计变量产生 m 个随机数, 则随机数总数为 $((3+3n) \times m)$ 个, n 为正弦函数阶数。优化计算的第一步先不考虑加入正弦函数, 因此, 初始设计变量为 5 个。

② 各进程分别计算不同增量下的 $((3+3n) \times m)$ 条弹道。

③ 在各进程上得到各自的 $((3+3n) \times m)$ 条弹道中的最小转弯时间及相应的设计变量。

4) 用 MPI 进行收集、归约操作, 通过网络得到本轮计算中所有进程上的共 $(3 \times m \times n_p)$ 条控制弹道的满足约束条件的最小时间及相应的最优设计变量。

5) 将本轮计算所得的最小时间及相应的最优设计变量广播给所有进程, 作为下次寻优的初始设计变量。

6) 重复 3) ~ 5) 步, 进行 6 个设计变量的优化计算, 并统计未发现更优方案的计算次数。若未发现更优方案的计算次数超过了规定的次数, 则加入一阶正弦函数继续寻优, 此时, 设计变量增加 3 个, 总设计变量为 9 个。

7) 重复 3) ~ 5) 步, 进行 9 个设计变量的优化计算。若未发现更优方案的计算次数超过规定的次数, 则再加入一阶正弦函数继续寻优, 此时, 设计变量在原来的基础上再增加 3 个, 总设计变量为 12 个。

8) 重复 3) ~ 5) 步, 并统计控制规律中正弦函数展开的阶数。若未到规定阶数, 继续加入正弦函数寻优, 直到加入的正弦函数的阶数到达规定阶数为止。

9) 若计算步长小于规定的最小步长, 则计算停

止。否则, 将寻优步长缩小继续重复 3) ~ 8) 步。

10) 计算停止后, 得到最后一轮计算得到的最小时间及相应的设计变量。

11) 在 $0^\#$ 进程上计算转弯最小时间及对应最优设计变量 $[D^0]$ 。

5 垂直发射火箭弹转弯弹道的并行计算结果及分析

根据以上分析方法进行仿真分析计算, 图 1 ~ 图 5 所示为寻优过程中各设计参数的收敛过程。

图中横坐标为计算次数, 从图中可以看出: 经过多次迭代后, 各设计参数都趋于收敛, 这说明已寻到最优解, 同时说明用并行运算解决垂直发射火箭弹转弯的最优问题的确是比较有效的。

6 结论

仿真分析结果表明: 在满足一定的

姿态参数和运动参数精度要求的情况下, 最优控制弹道问题具有极好的并行性, 分布式并行计

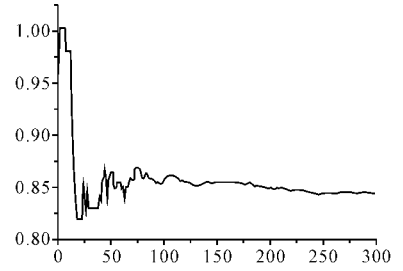


图 1 转弯所需时间的收敛过程

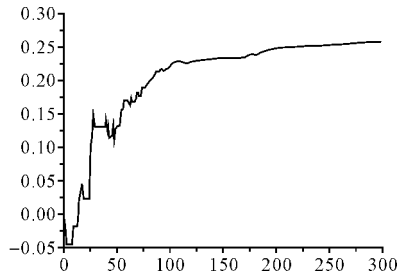


图 2 基线斜率的收敛过程

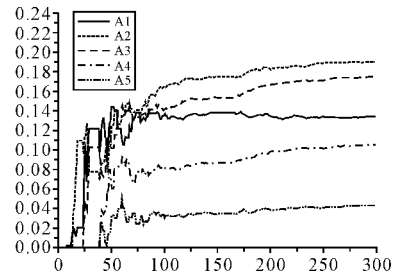


图 3 幅值的收敛过程

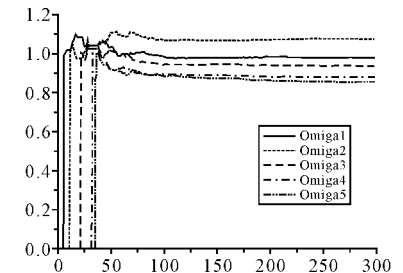


图 4 频率的收敛过程

算可显著
提高计算
效率,问题
的求解时
间随并行
机节点数
的增加而
成比例的
缩短。

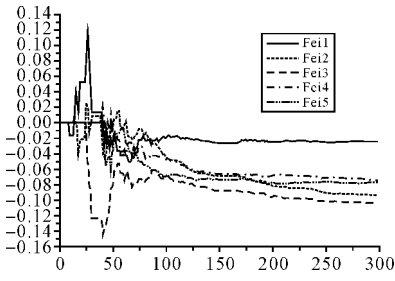


图 5 初相位的收敛过程

参考文献:

[1] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京:兵器工业出版社,1993:28-30.
 [2] 牛文章,方同祝. 并行算法在系统仿真中的应用[J]. 系统工程与电子技术,1999,21(9):22-25.
 [3] 余雄庆,丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中的应用[J]. 航空学报,2000,21(1):1-6.

(上接第 179 页)

俯仰角速率平衡于 0,迎角最终平衡于一个非常接近于初始迎角的位置。图 9 给出了配平过程中舵偏角变化的时间历程。其振荡收敛于平衡位置 $\delta_E = 3.23^\circ$ 。

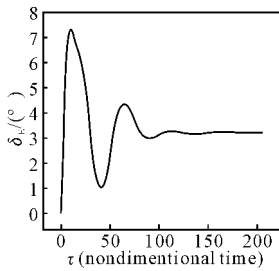


图 9 舵偏角时间历程

参考文献:

[1] Nielsen E J, Anderson W K. Aerodynamic design optimization on unstructured meshes using the Navier-Stokes equations[J]. AIAA Journal,1999,37(11):1411-1419.
 [2] Gaitonde A L, Fiddes S P. A moving mesh system for the calculation of unsteady flows[R]. AIAA-98-4353.
 [3] Dubuc L, Cantariti F. A grid deformation technique for unsteady flow computations[J]. Int. J. Numer. Mesh. Fluids, 2000,32(3):285-311.
 [4] Wigton L. Research in computation aerospace applications implemented on advanced parallel computing systems[R]. Final Report of NAS2-14090, March,1996.
 [5] H M Tsai. Unsteady flow calculations with a parallel multiblock moving mesh algorithm[J]. AIAA Journal,2001,39(6):1021-1029.
 [6] Trevor J Birch. Aerodynamic characteristics of a square cross-section missile configuration at supersonic speeds[R]. AIAA 2004-5197.

4 结 论

文中介绍了一种多块对接网格更新方法在非定常计算中的应用。该方法能够在计算过程中实现网格的有效更新,能够保持初始网格的拓补结构和网格质量。这种方法不依赖于初始网格生成方法,具有较大的灵活性。在 3 个具有湍流流动的例子中对本方法进行了有效的验证。研究表明采用变形网格与刚性动网格相比,对结果精度没有明显的影响,在具有运动边界的较复杂外形的非定常计算过程中可以较好的应用。