

文章编号: 1004 - 0609(2003) 05 - 1219 - 04

提高充型过程数值模拟运算速度的 动态超松弛迭代算法^①

吴士平^{1, 3}, 于彦东², 王丽萍³, 郭景杰¹

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080; 3. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 在模拟铝合金压铸件型腔充型过程时, 采用传统的固定松弛因子 ω ($0 < \omega < 2$) 不能有效地减少运算中的迭代次数, 而采用一种提高充型过程数值模拟运算速度的新算法—动态超松弛迭代算法, 在 $0 < \omega < 2$ 范围内, 运用自适应计算方法, 根据运算的迭代次数的增减可以决定松弛因子的增大或减少, 动态调整松弛因子可使运算中的迭代次数减少。经实际运算检验, 运用该方法可以大幅度提高运算速度, 运算的迭代次数减少 25%。

关键词: 数值模拟; 动态; 松弛因子; 充型过程; 铝合金

中图分类号: TG 244; TP 311

文献标识码: A

近年来随着科学技术的不断发展, 铝合金压铸件充型过程数值模拟的研究取得了极大的进步, 并且在实际工作中得到了很大的应用^[1~7]。铝合金压铸件充型过程数值模拟采用迭代计算方法, 在实际应用过程中特别是对于大型、复杂铝合金压铸件的计算时常常花费大量的时间, 直接影响了这一技术在生产实践中的应用。因此, 关于提高铝合金充型过程数值模拟速度的研究受到了普遍重视。本文作者等人在其发表的文章中指出, 采用超松弛因子可以提高运算速度, 减少迭代次数^[8]。陈立亮等的研究提出了动态超松弛因子的数学模型, 并在轮毂的充型过程数值模拟中进行了应用, 结果表明: 使用超松弛因子可以减少迭代次数, 提高运算速度^[9~12]。在上述研究的基础上, 本研究结合实际运算提出了一种自适应动态超松弛迭代新算法, 并且在实际运算中得到了应用。

1 液态金属充填铸型过程数值模拟

液态金属充填铸型过程数值模拟是以动量守恒方程, 即 Navier-Stokes (N-S) 方程和质量守恒方程, 即连续方程为基础, 通过追踪自由表面来得到任意时刻的流场形状, 采用数值计算的方法求解

N-S 方程, 从而获得充型过程的速度场和压力场及流体的形状。在求解 N-S 方程时, 通常采用修正压力和试探速度的迭代算法进行求解, 在求解的迭代计算中, 通过连续性方程来检验所计算的速度是否符合要求, 具体处理方法如下。

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

对连续性方程进行离散处理, 然后计算单元的散度 $D_{i,j,k}$ 。

$$D_{i,j,k} = \frac{u_{i+1/2,j,k} - u_{i-1/2,j,k}}{\delta x_i} + \frac{v_{i,j+1/2,k} - v_{i,j-1/2,k}}{\delta y_i} + \frac{w_{i,j,k+1/2} - w_{i,j,k-1/2}}{\delta z_k} \quad (2)$$

若散度 $D_{i,j,k} < a$ (a 为给定的计算精度值), 说明该单元的计算速度是合理的, 则单元的速度无须调整; 若散度 $D_{i,j,k} > a$, 说明单元的计算速度不合理, 则需调整单元的速度。调整的方法采用修正压力的方法, 通过推导得出压力修正公式为

$$\delta p^n = - \frac{D_{i,j,k}}{\frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial p}} \quad (3)$$

其中

① 基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(F9912); 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(9551108)

收稿日期: 2002 - 11 - 19; 修订日期: 2003 - 03 - 05

作者简介: 吴士平(1963 -), 男, 副教授, 博士。

通讯联系人: 于彦东, 哈尔滨市南岗区学府路 52 号 89 信箱 哈尔滨 150080; E-mail: yandongyu@yahoo.com.cn

$$\frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial p} = \frac{\delta t}{\delta x_i} \left(\frac{1}{\rho \delta x_{i+1/2}} + \frac{1}{\rho \delta x_{i-1/2}} \right) + \frac{\delta t}{\delta y_j} \left(\frac{1}{\rho \delta y_{j+1/2}} + \frac{1}{\rho \delta y_{j-1/2}} \right) + \frac{\delta t}{\delta z_k} \left(\frac{1}{\rho \delta z_{k+1/2}} + \frac{1}{\rho \delta z_{k-1/2}} \right) \quad (4)$$

修正压力为

$$p^{n+1} = p^n + \delta p^n \quad (5)$$

上述公式中 u, v, w 为流速在3个坐标轴方向上的速度分量, m/s; $\delta x, \delta y, \delta z$ 为空间步长在 x, y, z 坐标轴上的分量, m; δp 为修正压力, Pa; p 为流场中 (x, y, z) 点的压力, Pa; ρ 为金属流体的密度, kg/m³; δt 为时间步长, s。

采用修正压力和试探速度的迭代算法进行求解, 新的试探速度的计算式为

$$\begin{aligned} u'_{i+1/2, j, k} &= u'_{i+1/2, j, k} + \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta x_{i+1/2}} \\ u'_{i-1/2, j, k} &= u'_{i-1/2, j, k} - \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta x_{i-1/2}} \\ v'_{i, j+1/2, k} &= v'_{i, j+1/2, k} + \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta y_{j+1/2}} \\ v'_{i, j-1/2, k} &= v'_{i, j-1/2, k} - \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta y_{j-1/2}} \\ w'_{i, j, k+1/2} &= w'_{i, j, k+1/2} + \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta z_{k+1/2}} \\ w'_{i, j, k-1/2} &= w'_{i, j, k-1/2} - \frac{\delta t \cdot \delta p^n \cdot \omega}{\rho \delta z_{k-1/2}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 ω 为松弛因子 ($0 < \omega < 2$), n 与 $n+1$ 为修正循环次数。 ω 的范围表明松弛因子可以取 0~2 之间的任何一个数, 然而, ω 的取值是否合适对迭代次数及运算速度有直接影响, 但究竟是 ω 取值大能减少迭代次数, 还是 ω 取值小可以减少迭代次数, 这并无规律, 完全取决于计算当时的情况。迭代次数与计算压铸件单元的多少, 计算压铸件的复杂程度及计算精度等因素有直接关系。在计算初期, 由于计算单元数少, ω 的影响很小。但是, 在计算复杂压铸件和计算单元较多, 特别是到计算后期, 迭代次数明显增加, 如何选取 ω 是个很大的问题。为此, 本研究提出了自适应动态超松弛迭代算法, 在计算过程中根据每次计算的迭代次数自动调节 ω 值, 达到使每一次计算的迭代次数为最小。首先, 在 0~2 之间任意指定一个数赋予 ω , 然后进行运算, 并且记录下本次计算的迭代次数作为基础数据, 在此基础上再一次以此 ω 值进行计算, 将本次计算的迭代次数和上次的迭代次数进行比较, 如果本次迭代次数多于上次迭代次数, 则说明本次所取

的 ω 值不是最好的, 需要调整 ω 。然而, ω 是增大好还是减小好, 我们不妨在此基础上减去一个 $\Delta\omega$ 或加上一个 $\Delta\omega$, 然后继续计算, 将计算所获得的迭代次数和上一次进行比较, 若迭代次数少于上次的迭代次数, 则说明上一个 $\Delta\omega$ 的加或减是正确的, 则继续保持上一次的符号; 反之, 若迭代次数多于上次的迭代次数, 则说明上一个 $\Delta\omega$ 的加或减是不对的, 这时需要改变上一次 $\Delta\omega$ 的符号; 若上一次是加, 则这一次就应当改为减; 若上一次是减, 则这一次就应该改为加, 依次类推。总之, 以迭代次数为基础, 通过比较本次计算的迭代次数和上次迭代次数, 来决定下次计算的 ω , 自动适应最低的迭代次数, 其流程图如图 1 所示。

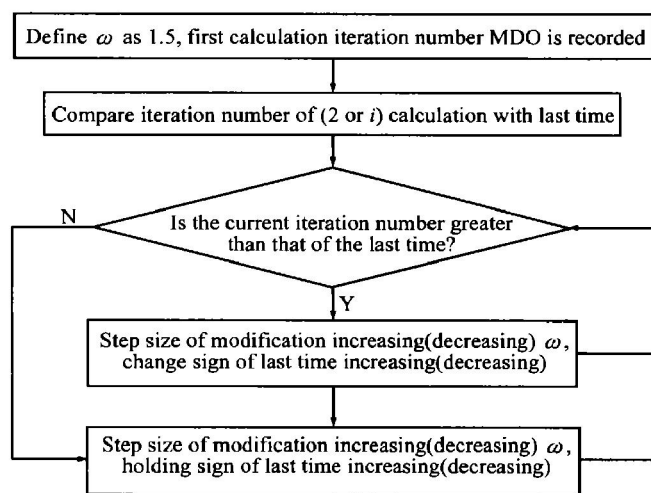


图 1 动态因子计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart of dynamic factor

2 计算结果及分析

将上述建立的模型应用于数值模拟程序中, 使用 P II-233 计算机, 计算单元为 61384, 分别采用静态因子和动态因子进行计算, 然后从实际计算中分段取出几个部分, 其对应数据如图 2 所示。图 2 表明了使用静态因子和使用动态因子的计算时间与迭代次数的关系。由图 2 可以看出, 对应同一计算时间, 静态松弛因子的迭代次数多于动态松弛因子的迭代次数, 动态超松弛因子的迭代次数在短时间内即使迭代次数处于最低状态, 整体计算的时间如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 由于使用动态松弛因子时间节约了 2.2 h。图 3 所示为该件的数值模拟结果。图 4 所示为采用上述模拟方法模拟的实际铸件图。

从式(6)可以看出, ω 的主要作用是调整修改试探速度的步伐: 当 ω 大于 1 时, 增加每次计算时速度的修改步伐; 反之, 减少每次计算时速度的修

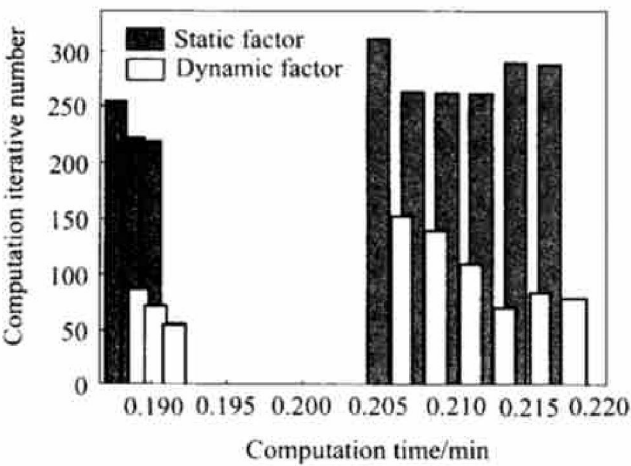


图 2 静态和动态因子迭代次数关系图

Fig. 2 Iterative degree for dynamic and static factor

表 1 静态和动态因子计算时间的比较

Table 1 Comparison of computing time for static and dynamic factor

Factor	Starting time	Ending time	Time required
Static	11: 50: 36	20: 54: 55	09: 04: 18
Dynamic	20: 42: 43	03: 34: 38	06: 51: 43

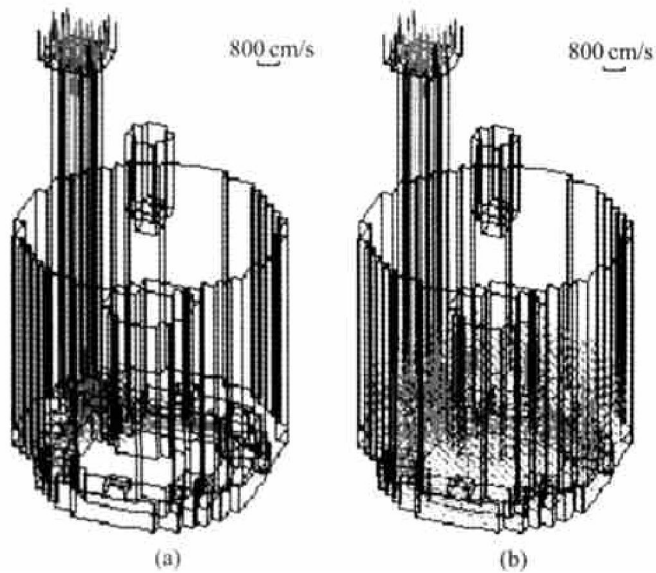


图 3 圆桶形铸件的充填过程数值模拟结果

Fig. 3 Simulated results of filling process for cylinder casting
(a) -0.8 s; (b) -4.0 s



图 4 模拟计算的铸件

Fig. 4 Casting by simulation calculation

调整量加大, 此时, 采用加大修改速度的步伐, 来修改试探速度, 可以减小计算的迭代次数。当内部充满单元占大多数时, 其速度相对变化较小, 若采用较大的修改步伐, 会加大已经是正常计算速度的调整量, 因此, 此时采用相对较小的 ω 来修正速度较为合适。采用自适应动态因子 ω 正是根据这个原理, 自动调整 ω 使得它可以通过计算的迭代次数来作为判断的依据, 自动修改 ω 来适应计算的情况, 使得计算的迭代次数较小。由于静态因子不考虑计算的具体情况, 因此, 在计算中静态因子不能保证计算迭代次数最小。

REFERENCES

[1] Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M H. Numerical simulation of three-dimensional mold filling process in resin transfer molding using quasi-steady state and partial saturation formulations [J]. Composites Science and Technology, 2002, 62(5): 861 - 879.

[2] Hu B H, Tong K K, Niu X P, et al. Design and optimization of runner and gating systems for the die casting of thir-walled magnesium telecommunication parts through numerical simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105(9): 128 - 133.

[3] Shepel S V, Paolucci S. Numerical simulation of filling and solidification of permanent mold castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 22(2): 229 - 248.

[4] Tong K K S, Hu B H, Yee F C. Industrial application of computer simulation in mould design for pressure die cast-

- ing[A]. Proceedings of International Conference on Mechanics of Solids and Materials Engineering[C]. Singapore: International Materials Park, 1995. 235 - 240.
- [5] Hu B H, Hao S W, Niu X P, et al. Optimisation of mould design in die casting of pewter parts through numerical simulation[A]. Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing[C]. Singapore: Nan yang Technological University, 1997. 885 - 893.
- [6] Niu X P, Hao S W, Hu B H, et al. Application of numerical simulation in die casting processes[A]. Mould Design, Proceedings of the Australasia-Pacific Forum on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials[C]. Australia: Springer, 1997. 1363 - 369.
- [7] Frayce D, Hetu J F, Loong C A. Numerical modeling of filling and solidification in die casting[A]. Transactions of the 17th International Die Casting Congress and Exposition[C]. Ohio: International Materials Park, 1993. 13 - 17.
- [8] 王君卿. 铸型充填过程模型化及流动场数值模拟[J]. 铸造, 1987, 12: 20 - 22.
WANG Jun-qing. Model of mold filling process and flow-field of numerical simulation[J]. Foundry, 1987, 12: 20 - 22.
- [9] Jong S H, Hwang W S. Three-dimensional mold filling simulation for casting and its experimental verification[J]. AFS Transactions, 1991, 99: 117 - 124.
- [10] CHEN Lǐ-liang, LIU Ruǐ-xiang, LIN Hang-tong. Study on the field of complex castings[A]. LIU Bai-cheng. 3rd Pacific Rim International Conference on Modeling of Casting and Solidification Process[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1996. 143 - 148.
- [11] 陈彦博, 温景林. 铝材连续铸挤动态凝固过程有限元分析[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 15 - 17.
CHEN Yan-bo, WEN Jing-lin. FEM analysis of solidification process in producing aluminum product through CASTEX technique[J]. The Chinese Journal of Non-ferrous Metals, 2001, 11(1): 15 - 17.
- [12] WU Shǐ-ping, GUO Jing-jie, SU Yan-qing, et al. Numerical simulation of melt mold filling during centrifugal casting of TiAl alloy exhaust valve[J]. International Journal of Cast Materials Research, 2002, 15(3): 5 - 7.

Dynamic over-relaxation iteration algorithm to increase operational speed of numerical simulation during filling mold

WU Shǐ-ping^{1, 2}, YU Yan-dong², WANG Lǐ-ping³, GUO Jing-jie¹

(1. School of Materials Science and Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin Science and Technology University,
Harbin 150080, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Harbin Science and Technology University,
Harbin 150080, China)

Abstract: A new algorithm—dynamic over-relaxation iteration algorithm was brought forward, which was used for increasing operational speed of numerical simulation during filling mold process. The dynamic over-relaxation iteration algorithm is aimed at reducing number of iteration. Using adaptive calculation method, the relaxation factor ω is changed according to increasing or decreasing of the number of iteration within the range from 0 to 2, thus dynamic adjustment of ω can be obtained. Practical calculation results show that the calculation iteration numbers can be reduced by 25%, and operational speed increases greatly.

Key words: numerical simulation; dynamic; relaxation factor; filling process; aluminum alloys

(编辑 李艳红)