

数控机床热误差补偿中分布滞后模型的建立*

姚焕新¹ 牛鹏程² 龚亚运² 邵善敏² 苗恩铭²

(1. 宁波工程学院机械工程学院, 宁波 315211; 2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘要: 针对数控机床热误差补偿建模中温度敏感点选择及模型建立问题, 提出用模糊聚类法和灰色关联法结合选择温度敏感点, 用分布滞后模型建立补偿模型的方法。根据机床关键点温度和热误差的实验数据, 分别建立热误差的多元线性回归模型和分布滞后模型。在一台 Leaderway V-450 型数控加工中心上进行热误差建模实验, 测量主轴分别在 2 000、4 000、6 000 r/min 下的热误差及温度, 结果表明分布滞后模型的拟合精度优于多元线性回归模型, 用任一转速下的实验数据建模时, 分布滞后模型的稳健性低于多元线性回归模型, 而综合任意两个转速下的实验数据建模时, 分布滞后模型的稳健性略优于多元线性回归模型。利用分布滞后模型建立的预测模型在数控机床热误差补偿中具有实用性。

关键词: 数控机床 热误差 分布滞后模型 多元线性回归模型 稳健性

中图分类号: TG659; TH161⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0246-05

Establishment of Autoregressive Distributed Lag Model in Thermal Error Compensation of CNC Machine Tools

Yao Huanxin¹ Niu Pengcheng² Gong Yayun² Shao Shanmin² Miao Enming²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Due to the problems of temperature-sensitive point selection and model establishment in the modeling of CNC machine tools thermal error compensation, the method was presented by combined with fuzzy clustering and grey correlation to select temperature-sensitive points and the autoregressive distributed lag was used to establish model. According to the experimental data of machine temperature and thermal error, multiple regression model and autoregressive distributed lag model were built respectively. The modeling test of thermal error was designed on the Leaderway V-450 CNC machining center, the thermal error and temperature data were measured on the conditions of the spindle speed in 2 000, 4 000 and 6 000 r/min. The result showed that fitting accuracy of distributed lag mode was better than that of multiple regression model, robustness of distributed lag mode was lower than that of multiple regression model when experimental data of any spindle speed was used to modeling, but the robustness of distributed lag mode was prior to multiple regression model when experimental data of any two spindle speeds were used to modeling. Application of autoregressive distributed lag model for CNC machine tools thermal error prediction can be useful.

Key words: CNC machine tools Thermal error Autoregressive distributed lag model Multiple regression model Robustness

引言

数控机床热误差是导致数控机床加工误差的主

要原因, 研究表明, 机床热变形引起的加工误差占整个加工误差的 30% ~ 70%^[1-2]。采取有效措施补偿数控机床热误差是实现数控机床高精度加工的重

要技术^[3-4]。数控机床热误差补偿技术关键在于模型的简捷性、准确性与稳健性,这与温度敏感点的选择、热误差补偿模型的建立等技术紧密相关^[5],对此国内外学者已经进行了大量的研究^[6-11]。

选择温度敏感点时采用模糊聚类分析方法和灰色关联度方法各有利弊,根据二者优点进行整合,则可以很好地发挥各自优势,提高温度敏感点选择精度、减轻工作强度。对于模型的优劣评价,关键在于模型的稳健性与精度。稳健性好坏,与建模变量中含有的实际误差源关系紧密。对复杂的数控机床热误差影响源逐个进行分析,难度较大。采用单一的回归算法进行统计量建模预测,则误差源含量较少,预测性下降。为更多引入误差源信息,本文考虑采用时间序列中的分布滞后模型^[12-13],通过滞后项保留更多误差源信息。但由于分布滞后模型中自变量 x_t 与其滞后量 x_{t-1} 存在明显的相关性,会造成多重共线性问题影响模型拟合精度。对于多重共线性问题,若自变量之间只是部分相关就可以进行最小二乘拟合其系数,但用于预测时其估计量和标准差对条件的微小变化非常敏感,这就要求这种共线性的结构关系要继续存在于未来的样本之中,也就是实验样本量要大,信息量要全。

本文对 Leaderway V-450 型数控加工中心进行多批次热误差测量实验,提出采用模糊聚类与灰色关联度相结合的方法用于热误差温度敏感点的筛选。热误差建模算法繁多,但模型的准确性与稳健性是衡量模型优劣的重要标准。本文分析分布滞后模型算法在数控机床热误差补偿技术中的特征,并与目前应用广泛的多元线性回归模型进行建模精度与稳健性比对分析。研究分布滞后模型在不同实验条件下的建模精度和稳健性变化规律,深入分析分布滞后模型稳健性特点。

1 热误差测量实验

对 Leaderway V-450 型数控加工中心结构进行分析可知,其主轴(Z轴方向)热变形主要与主轴转动发热和环境温度有关。然而主轴上哪点才是影响主轴热变形的最佳敏感点,则需要主轴的不同位置安装温度传感器,然后再通过一定的数学方法进行筛选,确定出最佳敏感点来。

本次实验的温度传感器安放位置如图1所示,T2、T3、T5、T6和T7安放在主轴套筒上,T8安放在主轴上端箱体上,T9安放在机床外壳上用于测量环境温度。图中S表示测量热误差的电感传感器。

机床加工过程中,机床转速往往根据所要加工零件的精度自行选择,不同转速下机床热误差不同。

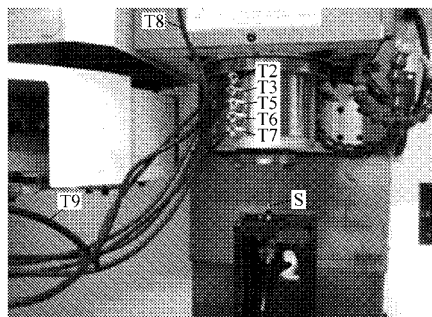


图1 热误差测量实验装置

Fig.1 Experimental device of thermal error measurement

为了提高热误差补偿模型的稳健性,实验分别对数控机床在转速为2000、4000和6000 r/min条件下的主轴方向热误差和温度进行了测量。实验开始前开机预热15 min并调整Z轴使电感测微仪处在合理测量范围内,然后设定机床转速并通过程序控制机床每工作3 min测量一次,主轴沿Z轴方向运动到设定的位置,记录温度传感器和电感测微仪的读数。

2 传感器选择

在数控机床热误差建模中,合理有效地筛选温度敏感点有助于提高机床热误差建模精度。常用热误差建模温度传感器筛选方法有模糊聚类算法和灰色关联度分析法。

2.1 模糊聚类

模糊聚类方法依据模糊矩阵对所有的研究对象进行分类,同一个簇中的对象有很大的相似性,而不同簇间的对象有很大的相异性。设论域为 $U = \{u_i | i = 0, 1, \dots, N\}$ 。其中 u_i 代表各温度测点。为了对 U 进行分类,需要计算被分类对象间的相关关系统计量相关系数 r_{ij} ,确定模糊矩阵,通过传递闭包法将模糊矩阵转换为等价矩阵,最终完成模糊分类的目的。

设 $u_i \in U$, u_{ik} ($k = 1, 2, \dots, n$)为 u_i 的 n 个测量值,定义相关系数为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik} - \bar{u}_i)(u_{jk} - \bar{u}_j)}{\sqrt{(u_{ik} - \bar{u}_i)^2 (u_{jk} - \bar{u}_j)^2}} \quad (i = 0, 1, \dots, N) \quad (1)$$

其中 $u_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_{ik}$ $u_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n u_{jk}$

这样,得到模糊矩阵 $R = (r_{ij})_{N \times N}$,显然 R 满足自反性和对称性,是模糊相似矩阵。

从模糊相似矩阵 R 出发通过平方法求其传递闭包 $t(R)$,而 $t(R)$ 即为所求的等价模糊矩阵,当 $R^{2k} = R^{2(k-1)}$ 时, $t(R) = R^{2k}$ 。有了等价矩阵 $t(R)$ 后,就可以对 U 进行模糊聚类。令 $\bar{R} = t(R)$ 为 $t(R)$ 在 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$)处的截集,记 $\bar{R} = (\bar{r}_{ij})_{N \times N}$ 。当 $\bar{r}_{ij} = 1$

时, u_i 与 u_j 属于同一类。

2.2 灰色关联度

灰色系统理论提出了对各子系统进行灰色关联度分析的概念,通过一定的方法,寻求系统中各因素之间的数值关系。简言之,灰色关联度分析的意义是指在系统发展过程中,如果两个因素变化的态势是一致的,即同步变化程度较高,则可以认为两者关联较大;反之,则两者关联度较小。因此,灰色关联度分析对于一个系统发展变化态势提供了量化的度量,非常适合历程分析。灰色关联度计算公式为

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (2)$$

$$r(x_0(k), x_i(k)) =$$

$$\frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式中 ρ ——分辨系数, $\rho \in [0, 1]$

r ——灰色关联系数

根据以上公式计算出数控机床热误差分别与各个温度测量数据之间的关联度 $\gamma(x_0, x_i)$, 关联度越大,说明该温度对数控机床热误差影响较大,可以考虑将该温度纳入建模。

3 模型选择

数控机床热误差补偿运用最广泛的是多元线性回归模型,当自变量与因变量线性度很高时,它更直观简单。但考虑到机床主轴中温度的非均匀分布和热传导过程中的时滞性,将时间序列中的分布滞后模型引入机床热误差建模中来。

3.1 多元线性回归模型

多元线性回归是一种用统计方法寻求多输入和单输出关系的模型。热误差的多元线性回归模型以多个关键温度敏感点测量温度值为自变量,以热变形量为因变量,其通用表达式为

$$y_i = b_0 + b_1 x_{i1} + b_2 x_{i2} + \dots + b_k x_{ik} + e_i \quad (4)$$

$(i = 1, 2, \dots, n)$

式中 x_{ik} ——关键温度敏感点温度测量值

b_k ——温度变量的系数

$$R = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.9989 & 0.9989 & 0.9989 & 0.9988 & 0.9804 & 0.9618 \\ 0.9989 & 1.0000 & 0.9995 & 0.9989 & 0.9988 & 0.9804 & 0.9618 \\ 0.9989 & 0.9995 & 1.0000 & 0.9989 & 0.9988 & 0.9804 & 0.9618 \\ 0.9989 & 0.9989 & 0.9989 & 1.0000 & 0.9988 & 0.9804 & 0.9618 \\ 0.9988 & 0.9988 & 0.9988 & 0.9988 & 1.0000 & 0.9804 & 0.9618 \\ 0.9804 & 0.9804 & 0.9804 & 0.9804 & 0.9804 & 1.0000 & 0.9618 \\ 0.9618 & 0.9618 & 0.9618 & 0.9618 & 0.9618 & 0.9618 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

y_i ——热变形量观测值

e_i ——与实际观察值 y_i 存在的偏差, e_i 有时也称为残差

用残差平方和评价全部观测值与回归估计值的偏离程度。通过残差平方和计算出模型标准差用于评定模型的拟合精度。最小二乘法常用于拟合多元线性回归模型中的系数。

3.2 分布滞后模型

如果因变量不仅与一个或多个解释变量的当前值有关系,而且与其若干滞后值有关系,描述这种关系的模型称为分布滞后模型,记为

$$y_t = \alpha_0 + \sum_{j=1}^u \sum_{i=0}^n \beta_{j,i} x_{j,t-i} + \varepsilon_t \quad (\varepsilon_t \sim \text{IID}(0, \sigma^2)) \quad (5)$$

式中 n ——最大滞后期 α_0 ——常数

u ——外生变量个数 ε_t ——随机误差项

y_t ——因变量 $\beta_{j,i}$ ——系数

$x_{j,t-i}$ ——第 j 个自变量的 $t-i$ 阶滞后值

对于滞后阶数 n 的确定,由于实验测量数据量比较大,所以可以采用简单的权宜估计法。即取 $n = 1, 2, \dots, i$, 对不同的 i 条件下经最小二乘拟合,当滞后变量的回归系数开始变得统计不显著,或其中有一个变量的系数改变符号时, $i-1$ 就是最终的滞后阶数。

4 实验建模

实验分别测量了机床 2 000、4 000、6 000 r/min 3 组转速。首先要选择最佳温度敏感点;其次分别对各转速下测得数据建立多元线性回归模型和分布滞后回归模型,然后对其他各组数据通过补偿来验证模型的稳健性;最后综合不同转速条件下数据建立多元线性回归模型和分布滞后模型来补偿其他转速,然后比较其精度。通过以上的比较来论证分布滞后模型在数控机床热误差补偿中的可行性。

4.1 温度敏感点选择

在选择温度最佳敏感点时用模糊聚类和灰色关联合法筛选。

对 2 000 r/min 温度点 T2 ~ T9 的模糊聚类分析为

取 $\lambda = 0.97$, 分类结果为

$$e(R) = R^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据模糊聚类结果将温度传感器 T2、T3、T5、T6、T7 和 T8 归为一类记为组 I, 将温度传感器 T9 归为一类记为组 II。因为组 I 中有 6 个温度传感器, 所以必须对 6 个传感器测量温度分别与热误差进行灰色关联度分析, 将关联度高的温度测点作为敏感点用于热误差建模。灰色关联度计算结果如表 1。

表 1 灰色关联度计算结果

Tab. 1 Calculation result of grey relational method

温度传感器	T2	T3	T5	T6	T7	T8
灰色关联度 γ	0.595 8	0.600 9	0.606 1	0.612 7	0.624 0	0.564 5

由表 1 可知 T7 与热误差 S 之间灰色关联程度最高, 所以组 I 中选择 T7 作为敏感点。由此可以选出最佳温度敏感点为 T7 和 T9。

同理对 4 000 和 6 000 r/min 进行温度敏感点选择, 结果与 2 000 r/min 一致。

4.2 单批次数据建模精度比较

以中间值 4 000 r/min 为例进行分析。

多元线性回归模型拟合公式为

$$y = -9.390 4 + 4.670 5T_7 - 4.091 7T_9 \quad (6)$$

式中 T_7 ——T7 处温度 T_9 ——T9 处温度
标准差 $\sigma = 1.407 5$ 。

由权宜估计法判断分布滞后模型的滞后阶数为二阶, 且其拟合公式为

$$y_t = -37.717 5 + 9.791 9T_{7t} + 1.140 3T_{7t-1} - 3.640 4T_{7t-2} - 6.983 2T_{9t} - 0.475 7T_{9t-1} - 0.140 7T_{9t-2} \quad (7)$$

式中 T_{7t} ——T7 处当前温度
 T_{7t-1} ——T7 处一阶滞后温度
 T_{7t-2} ——T7 处二阶滞后温度
 T_{9t} ——T9 处当前温度
 T_{9t-1} ——T9 处一阶滞后温度
 T_{9t-2} ——T9 处二阶滞后温度

标准差 $\sigma = 0.665 2$ 。

将以上拟合模型用于 2 000、6 000 r/min 情况下进行补偿, 所得标准差如表 2 所示, 补偿后效果如图 2、3 所示。可以明显看出分布滞后模型的拟合精

度比多元线性回归模型高, 但其补偿其他转速时补偿精度较低, 也就是稳健性不好。

表 2 补偿标准差

Tab. 2 Compensation standard deviation

模型	2 000 r/min	6 000 r/min
多元线性回归模型	3.119 6	1.786 0
分布滞后模型	15.123 7	8.527 7

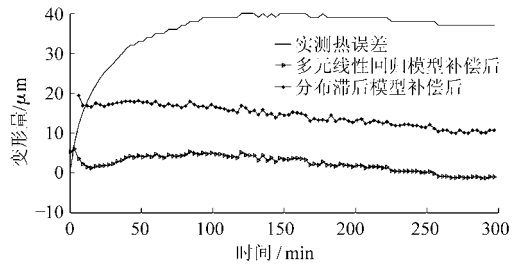


图 2 4 000 r/min 模型补偿 2 000 r/min 效果图

Fig. 2 Residual plots of 2 000 r/min with 4 000 r/min model

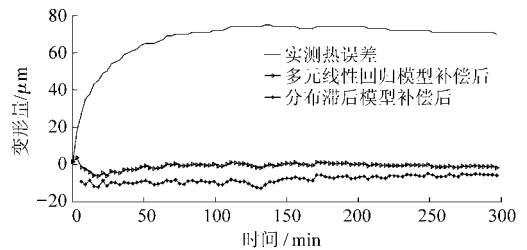


图 3 4 000 r/min 模型补偿 6 000 r/min 效果图

Fig. 3 Residual plots of 6 000 r/min with 4 000 r/min model

同理采用 2 000 和 6 000 r/min 进行建模然后补偿其他转速条件, 结论相同。

分析其原因, 主要是分布滞后模型本身具有的多重共线性问题造成的。由于所测机床热变形量中不只包含热误差, 而且各转速条件下的变化规律存在一些差异, 这些微小的变化会大大影响分布滞后模型的补偿效果。为了改善这种情况, 即提高分布滞后模型的预测精度, 可以采用综合不同转速条件下的数据进行建模。这些大量的数据包含了相对全面的信息, 也就克服了分布滞后模型中的多重共线性问题。

4.3 综合不同转速数据建模精度比较

以综合 2 000 和 4 000 r/min 的数据为例分别建立多元线性回归模型和分布滞后模型进行分析。

多元线性回归模型拟合公式为

$$y = -3.585 4 + 4.327 6T_7 - 3.884 5T_9 \quad (8)$$

标准差 $\sigma = 1.773 1$ 。

由权宜估计法判断分布滞后模型的滞后阶数为二阶, 且其拟合公式为

$$y_t = -0.570 5 + 3.394 5T_{7t} - 1.378 7T_{7t-1} + 2.227 6T_{7t-2} + 1.005 2T_{9t} + 0.918 6T_{9t-1} - 5.998 7T_{9t-2} \quad (9)$$

标准差 $\sigma = 1.5759$ 。

将 6 000 r/min 数据代入式(8)得标准差 $\sigma = 2.0874$,代入式(9)得标准差 $\sigma = 2.0047$,残差变化趋势如图4所示。

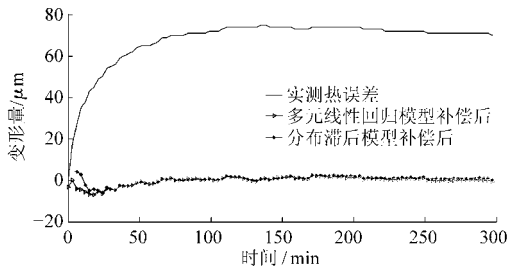


图4 综合 2 000 r/min 和 4 000 r/min 补偿 6 000 r/min 的残差图

Fig.4 Residual plots of 6 000 r/min with combination model of 2 000 r/min and 4 000 r/min

同理综合其他转速的数据进行分析,得出结论相同,即综合不同转速数据建模后,分布滞后模型的稳健性得到了明显提升,比多元线性回归模型的补

偿精度略高。这表明在数控机床热误差补偿中,通过对实验数据的综合处理可以很好地提升分布滞后模型的稳健性,使其具有可行性。

5 结论

(1) 对 Leaderway V-450 型数控加工中心进行热误差实验,综合模糊聚类法与灰色关联法各自优点选择最佳温度敏感点。

(2) 热误差具有时间滞后性,采用分布滞后模型可以将温度滞后项引入模型中,提高模型精度。

(3) 模型的优劣主要看其稳健性。对于小样本单批次数据进行建模时,多元线性回归模型的稳健性比分布滞后模型好,但对分布滞后模型深入分析知,可通过增加样本批次使模型中包含更全的信息量来克服模型中多重共线性问题,以此来提升分布滞后模型的稳健性。通过实验验证了分布滞后模型在机床热误差补偿中具有可行性。

参 考 文 献

- Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools—a review, part II: thermal errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40: 1 257 ~ 1 284.
- 潘淑微. 数控车床热误差鲁棒性建模的研究现状[J]. 工具技术, 2007, 41(5): 10 ~ 14.
Pan Shuwei. Summary of research status on thermal error robust modeling of NC lathe[J]. Tool Engineering, 2007, 41(5): 10 ~ 14. (in Chinese)
- 傅建中, 姚鑫骅, 贺永, 等. 数控机床热误差补偿技术的发展状况[J]. 航空制造技术, 2010(4): 64 ~ 66.
Fu Jianzhong, Yao Xinhua, He Yong, et al. Development of thermal error compensation technology for NC machine tool[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(4): 64 ~ 66. (in Chinese)
- 章青, 赵宏林. 数控机床误差补偿技术及热误差补偿技术[J]. 制造技术与机床, 1999(3): 26 ~ 28.
Zhang Qing, Zhao Honglin. Error compensation technology and thermal error compensation technology of CNC machine tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1999(3): 26 ~ 28. (in Chinese)
- 杨建国, 薛秉源. 数控机床热误差鲁棒建模新方法及时补偿[J]. 制造技术与机床, 1998(6): 8 ~ 10.
Yang Jianguo, Xue Bingyuan. Thermal error robust modeling and real-time compensation of CNC machine tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1998(6): 8 ~ 10. (in Chinese)
- 李永祥, 童恒超, 杨建国. 灰色系统理论在机床热误差测点优化中的应用[J]. 机械设计与研究, 2006(3): 78 ~ 80.
Li Yongxiang, Tong Hengchao, Yang Jianguo. Application of grey system theory in optimizing the measuring points of thermal error on machine tools[J]. Machine Design & Research, 2006(3): 78 ~ 80. (in Chinese)
- Week M. The reduction and compensation of thermal error in machine tools[J]. Annals of CIRP, 1995, 44(2): 589 ~ 597.
- Lo C H, Yuan J, Ni J. Optimal temperature variable selection by grouping approach for thermal error modeling and compensation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(9): 1 383 ~ 1 396.
- KIM S K, CHO D W. Real-time estimation of temperature distribution in a ball-screw system[J]. Int. J. Mach. Tools Manufacture, 1997, 37(4): 451 ~ 464.
- Yang S, Yuan J, Ni J. The improvement of thermal error modeling and compensation on machine tools by CMAC neural network[J]. Int. J. Mach. Tools Manufacture, 1996, 36(4): 527 ~ 537.
- 阳红, 向胜华, 刘立新, 等. 基于最优权系数组合建模的数控机床热误差在线补偿[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 216 ~ 221.
Yang Hong, Xiang Shenghua, Liu Lixin, et al. Online compensation for CNC machine thermal error based on optimal weights-based combined modeling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 216 ~ 221. (in Chinese)
- Gujarati D N, Porter D C. 计量经济学基础[M]. 5版. 费剑平, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- 李永祥, 童恒超, 曹洪涛, 等. 数控机床热误差的时序分析法建模及其应用[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(2): 74 ~ 77.
Li Yongxiang, Tong Hengchao, Cao Hongtao, et al. Application of time series analysis to thermal error modeling on NC machine tools[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(2): 74 ~ 77. (in Chinese)