

支持向量机的激光检测系统误差补偿及系统开发应用

王建军¹, 马晓帆², 姚斌², 刘万山²

(1. 中国一拖集团有限公司, 河南 洛阳 471003; 2. 厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 分析了激光三角法测距的位移以及包括入射倾角在内的被测表面特性等误差影响因素; 用高精度激光干涉仪和正弦规对激光位移传感器进行校对试验, 并用支持向量机学习方法建立了误差补偿模型; 基于激光位移传感器方法和机器学习误差预测模型, 使用 PyQt 设计并实现了激光检测误差补偿系统。应用表明, 激光检测误差补偿系统可以有效地减少激光位移传感器的测量误差。

关键词: 激光三角法; 误差校对试验; 支持向量机; 系统开发及应用

中图分类号: TN247; TP29

文献标志码: B

文章编号: 1006-0006(2019)04-0021-05

Error Compensation of Laser Measurement Based on SVR and System Development and Application

WANG Jianjun¹, MA Xiaofan², YAO Bin², LIU Wanshan²

(1. YTO Group Corporation Luoyang 471003, China;

2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on the measurement principle of laser triangulation measurement system, this paper analyzes the displacement of laser triangulation and influence factors such as the measured surface characteristics including the incidence angle. The laser displacement sensor is proofread by high-precision laser interferometer and sine gauge, and the error compensation model is established by using support vector machine learning method. Based on the laser displacement sensor method and machine learning error prediction model, the laser measurement error compensation system is designed and implemented using PyQt. Applications are shown that the laser measurement error compensation system can effectively reduce the measurement error of laser displacement sensor.

Key words: Laser triangulation; Error correction experiment; Support Vector Machine(SVM); System development and application

激光三角测距法作为一种比较成熟的非接触式测量位移方法, 具有测量精度高、抗干扰能力强、结构简单和使用灵活等优点, 被广泛应用于实际工业生产现场。该测量方法与现有高精度测量系统的融合, 使激光三角测距传感器实现自由曲面的高精度测量成为可能。由激光三角测距的原理可知, 激光三角法测量的误差因素主要有: ①受横向放大倍率和物镜畸变影响而引入的成像系统误差; ②因数据处理和系统安装因素影响而引入的数据处理误差和系统安装误差; ③因环境因素(如温度、湿度等)影响而引入的环境因素误差; ④因被测表面特性变化而引入的误差, 主要包括测量倾角、被测表面颜色、粗糙度、安装倾角等误差因素引起的位移值偏离误差。其中, 对于现有激光位移传感器而言, 其数据的处理误差、系统安装误差、物镜畸变率、温度及湿

度等环境因素均得到较高的控制。因此, 影响激光三角测距精度的主要误差因素为被测表面特性变化引入的误差^[1-2]。

1 激光三角测距法及倾角误差

在点激光位移传感器测量系统中(见图 1), 激光器发射出一束激光照射在被测物体表面并发生漫反射, 光斑被成像系统收集, 并成像于线阵 CCD 光敏面上。当被测点沿着激光束方向移动一段距离, 在 CCD 光敏表面上的像点也随之移动, 并且成像位置与测量位置起始点存在唯一的对应关系。当被测物体位于汇聚透镜焦点上(激光传感器位移值为 0), 光点 A 将被物镜成像于 A' 点。物体离焦时, 光点 B 将成像于 B'。由图 1 可知, 如果能够得到像点在 CCD 光敏面上的变化量 x' , 利用相似三角形的比

基金项目: 2016 年工信部智能制造综合标准化与新模式应用项目(工信部联装[2016]213 号)

收稿日期: 2018-09-07; 收修改稿日期: 2019-06-24

例关系,可以求得被测物体表面沿着法向方向的移动位移 x 。但离焦会引起像点的弥散,从而降低了系统的测量精度。为了提高精度 θ_1 和 θ_2 必须满足 Scheimpflug 条件,即

$$\tan \theta_1 = \beta \tan \theta_2 \quad (1)$$

式中: β 为接收物镜横向放大倍率; θ_1 为接收物镜光轴与激光束之间的夹角; θ_2 为接收物镜光轴与 CCD 光敏面之间的夹角。

$$x = \frac{ax' \sin \theta_2}{b \sin \theta_1 \pm x' \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (2)$$

式中: a 为接收透镜的物距,即 A 点与接收透镜前主面的距离; b 为接收透镜的像距,即接收透镜的后主面与成像面中心点的距离。被测物面在参考平面下方移动时取正号,上方移动取负号。

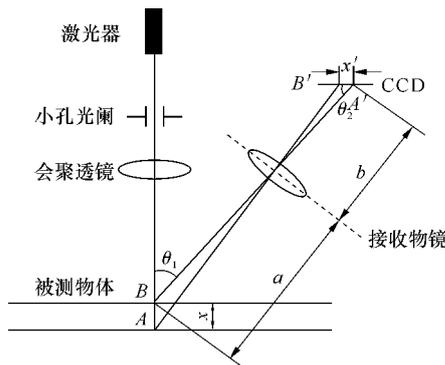


图1 激光三角测距法
Fig.1 Laser Triangulation Measurement

对于基恩士的产品而言,其产品的技术指标如表1所示。

表1 LK-H050 点激光位移传感器的主要参数
Tab.1 Parameters of LK-H050 Laser Displacement Sensor

参数	数值
型号	LK-H050
安装方式	漫反射
测量中心距/mm	50
测量范围/mm	±10
光点直径/μm	50
线性(满量程)/%	±0.02
再现性/μm	0.025
全量程单位温度特性/%	0.01

由表1可知,该激光传感器数据的处理误差、系统安装误差、物镜畸变率、温度及湿度等环境因素均得到很好的控制。也就是说,对于测量系统本身的一些误差源(如 a 和 b 的偏差)的影响可进行忽略。

假设 a 、 b 、 θ_1 、 θ_2 为定值,计算得到测量误差 δx 的关系式,即

$$\delta x = \frac{ab \sin \theta_1 \sin \theta_2}{[b \sin \theta_1 \pm x' \sin(\theta_1 - \theta_2)]^2} \delta x' \quad (3)$$

式中: $\delta x'$ 为 x' 的测量误差。

由式(3)可知, $b \sin \theta_1 \gg x' \sin(\theta_1 - \theta_2)$, 则

式(3)可以简化为

$$\delta x \approx \frac{\sin(\arctan(\frac{\tan \theta_1}{\beta}))}{\beta \sin \theta_1} \delta x' \quad (4)$$

忽略系统本身误差源,在均匀漫反射条件下,对于激光检测而言,主要影响因素为入射倾角。

2 倾角误差试验

2.1 激光测量传感器与激光干涉仪

本试验所采用的点激光位移传感器型号是基恩士厂家的 LK-H050,其采用红色半导体激光(650 nm)作为光源,通过将 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor,互补金属氧化物半导体)中的像素宽度和像素数翻倍,实现极高的精确度。全新开发的 HDE(Harmonic Diffraction Optical Element,谐波衍射光学元件)可将接受光元件上因光点变形而引入的误差降至最小。此外,由于此型号激光位移传感器采用 Delta Cut 技术,测量光点具有对称性,在同类产品中具有较高的测量精度。

试验中,将雷尼绍 XL-80 激光干涉仪测量值作为误差试验的标定基准。激光干涉仪的位移测量原理是激光双频干涉。针对长度测量,激光波长具有较好的溯源性,而且测量范围大,测量精度高,可以达到纳米级。激光干涉仪不仅可以用来检测一些范围大、精度高的几何量,还被常用于测量基准以及标定和校正一些精密测量仪器。试验使用的干涉仪主要参数如下:测量范围为 80 m;分辨力为 1 nm;线性精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 。

2.2 误差校对试验

误差校对试验装置(见图2)包括数控加工中心、点光位移传感器、激光干涉仪、正弦规、标准量块和分度盘等。激光位移传感器误差校对试验平台如图2所示。激光位移传感器安装在数控加工中心的 z 轴上,正弦规放置在激光位移传感器正下方的工作台上。激光干涉仪光路组件由磁力表架固定在 z 轴和工作台上。 z 轴可通过数控系统的控制进行移动^[3-4]。

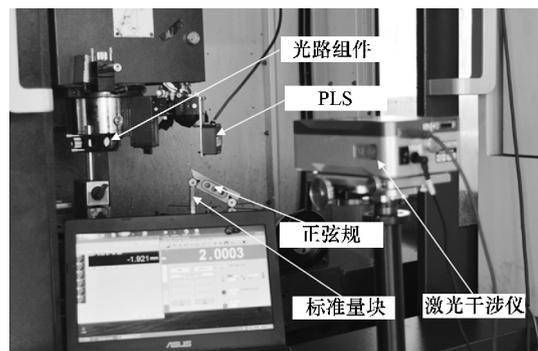


图2 激光位移传感器误差校对试验
Fig.2 Error Proofing Test for Laser Displacement Sensor

试验开始前,精确调整激光测头姿态,保证激光光束沿着被测点法线方向入射。完成对干涉仪光路组件位置的调整,保证激光测头在沿机床z轴方向移动的过程中,其光路不会发生偏移,且激光干涉仪能够准确读数。查阅相关文献^[5],并结合测量需求,试验搭建了倾角为0°~45°的误差校对试验平台。试验开始时,控制数控加工中心z轴上下移动,其移动范围控制在点激光位移传感器有效测量范围之内(-10~10 mm),每移动1 mm记录下激光位移传感器和激光干涉仪的数值。试验总共得到300组激光位移传感器与激光干涉仪的测量数据,它们的差值即为激光位移传感器的误差值。

3 基于支持向量机的预测模型

考虑到倾角误差试验中,倾角和位移影响因素与误差间的非线性关系,建立了基于支持向量机回归(support vector machine regression, SVR)算法的倾角误差预测模型,用于在已知影响因素情况下对倾角误差进行的预测。

Vapnik 等于 1995 年提出了支持向量机(SVM, Support Machine)概念,其建立是基于结构风险最小化原理以及 VC 维(VC dimension)概念,具体地,通过寻找一个最优分类线,既能将样本无误分开,又能将分类间隔最大化。SVM 不仅结构简单,而且克服了过学习以及维数灾等问题,具有较好的学习能力和泛化能力,常被用来解决非线性、小样本问题的识别和预测。针对回归预测,学者常建立 SVR 模型。

针对非线性回归问题,SVR 的基本思想是:通过一个非线性变换将输入变量 x 映射到一个高维特征(Hilbert)中,并在 Hilbert 中进行线性回归。通过变换,低维输入空间的非线性回归对应于高维特征空间的线性回归。其具体实现是通过核函数 $k(x_i, x) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x)$ 来完成的,其中 $\Phi(x_i)$ 、 $\Phi(x)$ 为数据 x_i 、 x 映射到高维空间的非线性映射,这样免去了在高维空间计算复杂的点积运算。优化问题的约束条件^[6]为

$$\sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C] \quad i = 1, \dots, l \quad (5)$$

式中: C 为平衡系数; α_i 和 α_i^* 为引入的 Lagrange 乘子,其中 $\alpha_i - \alpha_i^*$ 不等于 0 时对应的样本数据就是支持向量。

则在(5)式约束条件下的对偶优化问题为

$$W(\alpha, \alpha^*) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) k(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (y_i - \varepsilon) - \sum_{i=1}^l \alpha_i (y_i - \varepsilon) \quad (6)$$

式中: ε 为误差上限; y_i 为因变量。

则回归函数 $f(x)$ 可以表示为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x) + b_0 \quad (7)$$

式中: b_0 为偏置。

引入松弛变量 ξ_i, ξ_i^* , 用于处理函数 f 在 ε 精度下不能估计的数据。在约束条件下,寻找最小 w 的问题可以表示为凸优化问题,即

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C(\xi_i + \xi_i^*) \quad (8)$$

为求解(7)式中的 $\alpha_i - \alpha_i^*$, 在(5)的约束条件下,最大化(6)式即可求得。(7)式中的 b_0 取在边界上的一点便可进行计算,但出于稳定性考虑,推荐使用边界点上的平均值

$$b_0 = \text{average } e_k \left\{ \delta_k + y_k - \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x_k) \right\} \quad (9)$$

式中: δ_k 为预测误差; e_k 为损失函数。

利用上述模型对本文中的倾角误差进行预测。将试验所得数据分为训练样本数据和预测样本数据。使用训练样本数据对 SVR 模型进行训练,训练样本内 MSE(Mean Squared Error, 平均绝对误差)为 0.003 6,在接受范围内。对于 R^2 (Coefficient of Determination, 决定系数)而言,达到 0.91,说明模型具有连续的学习能力和泛化能力^[7]。图 3 为 SVR 拟合曲线。

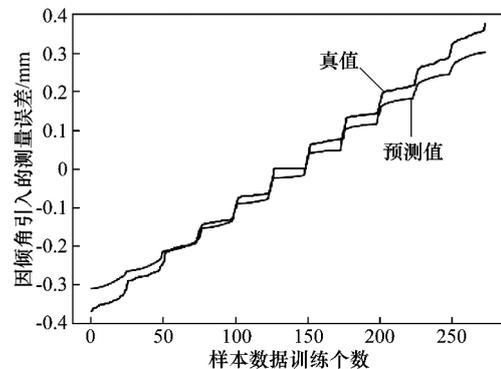


图3 SVR 模型拟合效果图
Fig.3 Fitting Effect Diagram of SVR Model

使用 SVR 模型测试数据,预测数值与真值(校对误差)的对比图如图 4 所示。从图 4 可以看到,数据点真值与预测值相近,说明 SVR 模型具有较好的倾角误差预测能力。

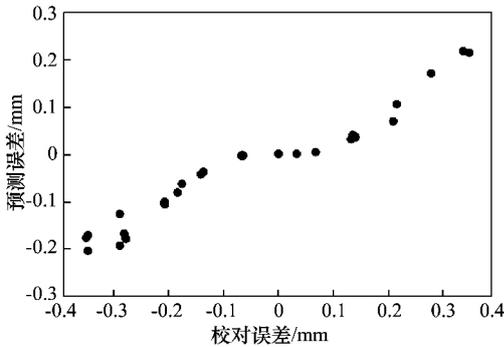


图4 SVR模型预测数值与真值对比图
Fig.4 Predicted and True Values of SVR Model

4 激光测量误差补偿系统

4.1 激光检测误差补偿系统开发

基于支持向量机的倾角误差预测模型,搭建了激光检测误差补偿系统。系统开发平台为 Python2.7、PyQt4 以及 Pycharm,运行平台为 Windows 7 操作系统。Python 是一种开源的脚本编程语言,由 ANSI C 编写,具有较强的可移植性。Pycharm 为 Python 的 IDE(Integrated Development Environment,集成开发环境),代码功能强大,支持 PyQt 集成开发,适合图形界面的 Python 应用程序的开发。PyQt 为 Python 与 Qt 的结合,既具备了 Python 强大的跨平台解释性脚本语言功能,又集成了 Qt 中 C++ 跨平台应用程序框架。

激光检测误差补偿系统界面包括功能按钮、选择框和文本框。用户通过操作上述功能使用界面命令,包括激光位移传感器安装误差和被测点倾角的键入、测量介质与被测表面颜色选择以及激光位移计算、倾角误差和补偿后结果计算等功能按钮^[8-9],图形界面如图5所示。

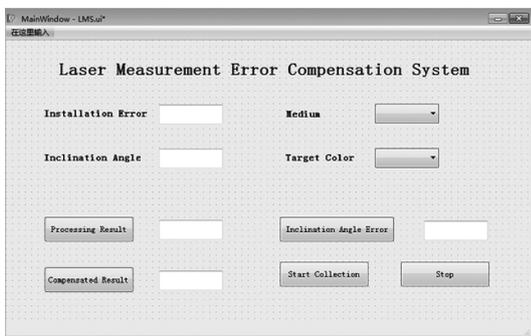


图5 激光检测误差补偿系统界面
Fig.5 Laser Measurement Error Compensation System

激光测量系统界面建立好后,将以上各功能模块以函数形式在 Python 开发环境中定义,包括倾角误差补偿函数、激光位移计算函数等,在 Python 主函数中调用主窗口对象、倾角误差补偿函数和激光位移计算函数等,完成激光检测误差补偿系统的搭

建,系统界面如图6所示。

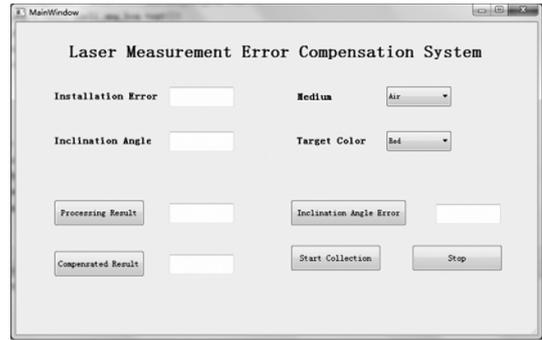


图6 激光检测误差补偿系统
Fig.6 Laser Measurement Error Compensation System

4.2 激光检测误差补偿系统的应用

鼓式刹车依靠强大的制动力和可靠性,仍配置在许多车型上。鼓式刹车就是利用刹车鼓内静止的刹车片,利用摩擦制动随着车轮转动的刹车鼓,以降低车轮转动速度^[10],图7为鼓式刹车片。高速下刹车会产生巨大的摩擦力,这使得鼓式刹车片在刹车鼓内的安装定位至关重要。如图7所示,刹车片沉头孔深尺寸 L_7 是其安装定位的重要尺寸,刹车片加工完成后需要对其检测。现有检测手段为接触式测量,测量效率和精度都比较低,也容易损伤工件,因此很多企业采用非接触式测量方法。但是,鼓形刹车片孔深测量点位于自由曲面上,激光测量会引入安装误差和因被测表面特性变化引入的误差等,因此使用激光检测误差补偿系统测量孔深。

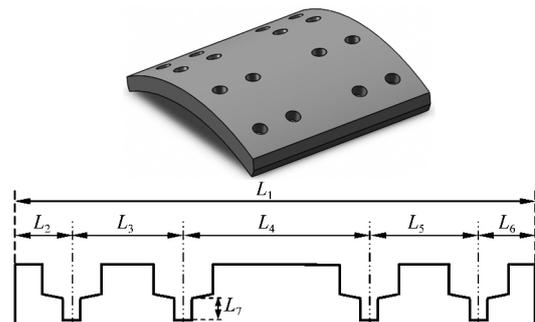


图7 鼓式刹车片及孔深要求
Fig.7 Drum Brake Pads and Hole Depth Requirement

检测选用的激光位移传感器测头与误差校对试验使用的测头型号相同,选用的控制器型号为 LK-G5001。试验并数据处理后发现:在没有对孔深进行误差补偿时,测量的孔深为 4.3 mm。使用激光检测误差补偿系统,设置测量介质为空气,测量目标颜色为灰色,如图8所示,标定后得出激光位移传感器安装误差为 0.641 mm,倾角误差为 10° ,应用机器学习得到倾角误差为 -0.1403 mm,补偿后孔深结果为 4.8007 mm,而图纸尺寸要求为 (4.8 ± 0.1) mm,补偿后测量精度大幅度提高。

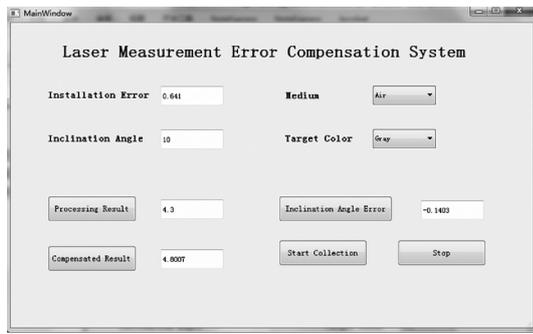


图 8 应用激光检测误差补偿系统测量孔深
Fig. 8 Measuring Hole Depth by Laser Error Compensation

5 结论

基于激光三角法测量系统的测量原理,对激光三角法测距的位移及入射倾角等误差影响因素进行了详细的分析及研究。基于上述误差影响因素完成了倾角误差补偿试验,建立了支持向量机学习模型。使用 PyQt 开发了激光检测误差补偿系统,并将其应用于鼓式刹车片孔深的测量。测量结果表明,孔深的测量精度得到了大幅度提高。

参考文献:

- [1] 程骏超,房建成,吴伟仁,等.基于 SVM 的激光陀螺温度误差建模与补偿方法[J].仪器仪表学报,2013,34(4):721-727.
- [2] NING G F, GAN Q. Simulation and analysis of error compensation

of laser displacement sensor [J]. Laser journal 2016, 37(4):37-40.

- [3] JIANG Z, SONG B, ZHOU X, et al. On-machine measurement of location errors on five-axis machine tools by machining tests and a laser displacement sensor [J]. International journal of machine tools & manufacture 2015, 95:1-12.
- [4] QUEST D, GAYER C, HERING P. Depth measurements of drilled holes in bone by laser triangulation for the field of oral implantology [J]. Journal of applied physics 2012, 111(1):75.
- [5] SUN B. A new error compensation strategy on laser displacement sensor in free-form surface measurement [C]//Optifab. Optifab 2015, 2015:96332N.
- [6] 王定成,方廷健,唐毅,等.支持向量机回归理论与控制的综述[J].模式识别与人工智能,2003,16(2):192-197.
- [7] ZHOU S, FANG L. Support vector machine modeling of earthquake-induced landslides susceptibility in central part of sichuan province, China [J]. Geo environmental disasters 2015, 2(1):1-12.
- [8] 黄建军,李宥谋,刘婧,等.基于 Python 语言的自动化测试系统的设计与实现[J].现代电子技术,2017,40(4):39-43.
- [9] 邱霞,段渭军,黄亮,等.基于 PyQt 无线传感器网络监控软件开发[J].现代电子技术,2014(16):65-67.
- [10] 闫文刚,杜铭.鼓式刹车片冲击强度测量结果的不确定度评定[J].工程技术:文摘版,2016(1):251.

(编辑 刘红云)

作者简介:王建军,第一拖拉机股份有限公司总经理助理,拖拉机动力系统国家重点实验室主任,教授/高级工程师,研究方向为智能制造装备技术。

农业机械推广鉴定大纲审定会在京召开

为贯彻落实新修订的《农业机械试验鉴定办法》《农业机械试验鉴定工作规范》,加快推进农机推广鉴定大纲制修订工作进度,农业农村部农业机械试验鉴定总站、农业机械化技术开发推广总站于2019年7月18日至19日在北京组织召开农业机械推广鉴定大纲审定会议。总站党委书记刘旭、总工程师仪坤秀,农机化司监督管理处副处长吴迪以及有关专家共50名代表参加了会议。

刘旭在讲话中要求,在大纲审定过程中,各位专家要严格把关,切实提高大纲制修订工作质量,各位起草人要按照专家组意见,仔细推敲、举一反三,认真做好大纲的修改完善工作。他强调,各相关单位要根据当地农业生产实际和农机化发展需要,研究提出后续推广鉴定大纲制修订计

划建议,同时,要深入贯彻落实国务院42号文件和《农业机械试验鉴定办法》,积极推进农机专项鉴定大纲制定工作,畅通农机创新产品鉴定渠道。

仪坤秀在讲话中深刻阐述了大纲制修订工作的重要意义,肯定了前期的工作成效,指出了存在的问题。她指出,要按照《农业机械试验鉴定办法》《农业机械试验鉴定工作规范》的相关规定,科学规范开展大纲制修订工作。她强调,后续要重点做好以下三项工作:一是建立完善大纲体系,二是加快大纲有效供给,三是推动大纲贯彻实施。

会议对83项推广鉴定大纲和21项大纲修改单进行了审查。

(摘自《中国农业机械化信息网》)

本刊加入“中国知网(CNKI)”系列数据库的声明

为适应我国信息化建设,扩大本刊及作者知识信息交流渠道,本刊现被《中国学术期刊网络出版总库》及CNKI系列数据库独家收录,其作者文章著作权使用费与本刊稿酬一次性给付(已在收取发表费时折减和换算为杂志赠阅)。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。