

复杂型面工件超声自动检测中的匹配定位方法

胡宏伟¹ 李雄兵² 倪培君³ 王向红¹

1. 长沙理工大学,长沙,410114 2. 中南大学,长沙,410075

3. 中国兵器科学研究院宁波分院,宁波,315103

摘要:为提高复杂型面工件超声自动检测的效率和通用性,研究了CAD模型已知时工件的匹配定位方法。首先使用人工缺陷贴片的超声C扫描数据获取待匹配特征点的位姿。然后以工件3个角点为特征点进行初始定位,由2个局部坐标系匹配得到初始匹配矩阵。最后根据点到曲面的最小距离原则进行精匹配定位,使用循环迭代及Menq算法进行寻优求解。实例表明,选用6个采样点时,匹配误差可控制在0.4mm以内,能很好地满足复杂型面工件超声自动检测的精度要求。

关键词:复杂型面工件;超声检测;曲面匹配;自动定位

中图分类号:TP391.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.015

Matching and Localization Method in Automatic Ultrasonic Testing for Complex Surface Parts

Hu Hongwei¹ Li Xiongbing² Ni Peijun³ Wang Xianghong¹

1. Changsha University of Science and Technology, Changsha, 410114

2. Central South University, Changsha, 410075

3. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo, Zhejiang, 315103

Abstract: To improve the efficiency and universality of automatic ultrasonic testing for complex surface parts, a matching and localization method was proposed when the CAD model of the part to be tested was given. The position of feature points to match by C-scan ultrasonic measurement data for artificial defect on the tested part was attained firstly. Then an approximate localization method using three corner points as feature points was studied; the initial matching matrix was calculated from the matching of the two local coordinate systems. Lastly, a precise localization was acquired according to the minimum distance principle from the point to the surface, and it was calculated by the cyclic iterative method and Menq algorithm. The results of an example show that the matching error is less than 0.4mm when selecting six sampling points, which can meet the accuracy requirement in automatic ultrasonic testing for complex surface parts.

Key words: complex surface part; ultrasonic testing; surface matching; automatic localization

0 引言

复杂型面工件在航空航天、兵器、车辆、船舶等重要装备上得到大量应用,对其质量和性能进行检测是保障装备运行安全及可靠性的重要环节。超声检测由于其特有的优势,在工业产品质量检测方面的应用日趋广泛^[1]。超声检测时,为了准确地采集到超声信号,探头轴线方向需要与被测点的法向重合^[2]。因此要实现复杂型面工件的自动超声检测,必须获得被测工件在检测坐标系的曲面数据。文献[3-4]通过超声测距方法人工采集大量曲面数据后进行曲面重构,提出了复杂型面构件超声测量与探伤的一体化方法。但该方法在工程应用时需要每个待测工件都进行曲面测量和曲面重构,因此检测效率低下,难以满足

现代化生产需求。文献[5-6]使用专用夹具进行定位,但该方法需要设计和加工专用夹具,导致检测成本高且通用性欠佳,另外夹具安装时还需经过严格的校正。Deng等^[7]通过图像的特征线、特征孔等对复杂航空件进行匹配,但此方法需增加三维成像设备,且不适应水浸式超声检测。

本文针对此问题研究了一种复杂型面工件超声自动检测的匹配定位方法,利用少量超声测量点数据实现被测工件与CAD模型的匹配定位,以提高复杂型面工件超声自动检测的效率和精度,同时提高超声自动检测系统的通用性。

1 复杂型面工件超声自动检测原理

在工件CAD模型已知的情况下,本文提出的超声自动检测方法的步骤如下:首先,在被测工件上选择若干用于匹配的特征点。在这些特征点处贴上人工缺陷,由超声检测机械手采集人工缺陷的超声信号并进行C扫描成像,辨识出特征

收稿日期:2011-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005252);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100162120042);湖南省自然科学基金资助项目(10JJ5061)

点。然后,由机械手运动学正解求出特征点在检测坐标系的坐标,再将特征点坐标与 CAD 模型对应数据点进行匹配计算,获得工件检测坐标系与 CAD 模型坐标系之间的转换关系。最后,根据 CAD 模型数据及坐标系转化关系获得整个工件表面在检测坐标系的坐标数据,并通过机械手运动学逆解得到整个工件的检测轨迹,从而实现超声自动检测。图 1 所示为复杂型面工件超声自动检测的流程。

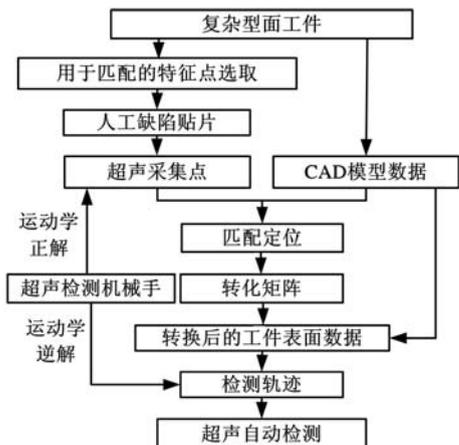


图 1 复杂型面工件超声自动检测流程

上述检测流程中,超声检测机械手的结构如图 2 所示,该机械手是一个空间开式运动链,一端固定,另一端自由(用以安装超声检测探头)。机械手由 5 根连杆(L_1, L_2, L_3, L_4, L_5)、3 个移动关节(A_1, A_2, A_3)、2 个转动关节(A_4, A_5) 组成,使得超声探头具有 x, y, z, a, b 五个运动自由度。图 2 中,探头和工件浸于水中, d 为测量时的水声距。按照 D-H 方法^[8]和连杆坐标系建立的原则,根据检测机械手各关节变量值,可获得工件上被测点在检测坐标系内的位姿(包括坐标及法矢),即得到机械手运动学正解^[9]。同时,超声检测要求探头中心线与曲面上被检测点的法矢重合,当被测点在检测坐标系内的位姿已知时,可获得超声检测机械手各关节变量,即得到机械手运动学逆解^[9]。

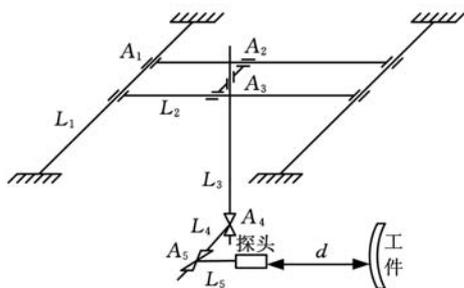


图 2 超声检测机械手

利用人工缺陷贴片来进行超声采集点的方法如下:选用与被测工件声阻抗差异大的材料作为

人工缺陷,如可选用聚四氟乙烯等作为金属工件的人工缺陷。将人工缺陷加工成直径为 5mm、厚度为 2mm 的贴片,贴于被测工件上用于匹配的特征点上,使贴片的圆心与该点重合。然后控制超声检测机械手,调节超声探头的位置和姿态,采集人工缺陷贴片附近的超声信号,进行超声 C 扫描成像,辨识出人工缺陷圆心,并根据超声检测机械手运动学正解得到特征点在检测坐标系的位姿。

2 匹配定位原理

忽略工件的细微变形,将工件视为理想刚体,分别建立 CAD 模型坐标系 $Q_0 X_C Y_C Z_C$ 及被测工件所在的检测坐标系 $P_0 X_G Y_G Z_G$, 如图 3 所示。待检工件和 CAD 模型坐标系位姿关系可用欧氏变化矩阵 M 表示^[10]:

$$M = \begin{bmatrix} R & 0 \\ T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z], R = [r_{ij}]_{3 \times 3}$$

$$r_{11} = \cos \beta \cos \gamma, r_{12} = \cos \beta \sin \gamma, r_{13} = -\sin \beta,$$

$$r_{21} = \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma,$$

$$r_{22} = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma,$$

$$r_{23} = \sin \alpha \cos \beta, r_{31} = \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma,$$

$$r_{32} = \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma, r_{33} = \cos \alpha \cos \beta$$

式中, T 为检测坐标系相对于 CAD 模型坐标系的平移矩阵; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为沿 X, Y, Z 方向的位移量; R 为相对于 CAD 模型的旋转矩阵; α, β, γ 分别为绕坐标轴 X, Y, Z 的旋转角度。

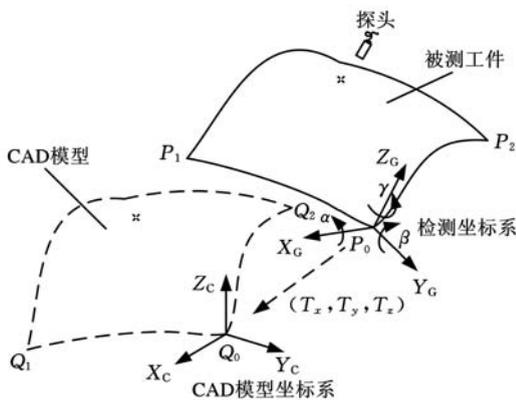


图 3 超声检测曲面匹配定位原理

如果已知矩阵 M , 则可由 CAD 模型的曲面数据得到工件在检测坐标系的曲面数据,即可获得被测点在检测坐标系的位姿信息,从而实现超声自动检测。因此,复杂型面工件的超声自动检测的匹配定位问题就可以转换成求解两个坐标系之间的变化矩阵 M (包括旋转矩阵 R 和平移矩阵 T), 即求解 $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 6 个未知量。

3 匹配定位实现方法

3.1 初始匹配定位

为了提高匹配定位的求解效率,首先进行初始匹配,初步获得变化矩阵 $\mathbf{M}^{[1]}$ 。取被测工件的 3 个角点 $P_j (j=0,1,2)$ 为匹配特征点,然后在对应 CAD 模型曲面上取 3 个方位完全对应的角点 Q_j ,构造如下两组单位矢量:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1 &= \mathbf{P}_1\mathbf{P}_0 / \|\mathbf{P}_1\mathbf{P}_0\|, \mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_1 \times \mathbf{P}_2\mathbf{P}_0 / \|\mathbf{P}_2\mathbf{P}_0\| \\ \mathbf{e}_2 &= \mathbf{e}_3 \times \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}'_1 &= \mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_0 / \|\mathbf{Q}_1\mathbf{Q}_0\|, \mathbf{e}'_3 = \mathbf{e}'_1 \times \mathbf{Q}_2\mathbf{Q}_0 / \|\mathbf{Q}_2\mathbf{Q}_0\| \\ \mathbf{e}'_2 &= \mathbf{e}'_3 \times \mathbf{e}'_1 \end{aligned}$$

分别以 P_0, Q_0 为原点,构建以向量组 $[\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_3]$ 及 $[\mathbf{e}'_1 \ \mathbf{e}'_2 \ \mathbf{e}'_3]$ 为坐标轴的两个局部坐标系。经过匹配变化后,两坐标系应重合,再根据式(1),得

$$[\mathbf{e}'_1 \ \mathbf{e}'_2 \ \mathbf{e}'_3]^T \mathbf{R}_1 = [\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \mathbf{e}_3]^T \quad (2)$$

式中, \mathbf{R}_1 为初始匹配旋转矩阵; \mathbf{T}_1 为初始平移矩阵, $\mathbf{T}_1 = \mathbf{P}_0 - \mathbf{Q}_0\mathbf{R}_1$; $\mathbf{P}_0, \mathbf{Q}_0$ 为点 P_0, Q_0 在坐标系中的位置矢量。

经过上述匹配,复杂型面工件与 CAD 模型之间实现了初步的定位,提高了后续的精匹配定位的计算效率。

3.2 精匹配定位

在被测工件上选取 m 个匹配特征点,通过前述的人工缺陷贴片和超声采集点方法,获取 m 个特征点 $p_i (i=1,2,\dots,m)$ 。

精匹配定位问题可以描述为:寻找旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} ,即使得被测工件上的特征点经转化后与 CAD 曲面对应点之间的距离最小,即下式所示的最小二乘目标函数取极小值:

$$J(\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k) = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{q}_{i,k} - \mathbf{p}_{i,k}\|^2 = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{q}_{i,k} - (\mathbf{R}_k\mathbf{p}_{i,k-1} + \mathbf{T}_k)\|^2 \quad (3)$$

式中,下标 k 表示第 k 次匹配(初始匹配时 $k=1$); $\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k$ 分别为第 k 次匹配的旋转矩阵和平移矩阵; $p_{i,k-1}$ 为被测工件上的点 p_i 经 $k-1$ 次匹配后的点; $q_{i,k}$ 为 $p_{i,k}$ 到 CAD 模型曲面的最近的理论点; $J(\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k)$ 为第 k 次匹配后的目标函数,简记为 J_k 。

上述求解变化矩阵使得目标函数取极小值的问题,可转化为非线性规划问题,其迭代求解步骤如下:

(1) 令 $k=1$,以初始匹配得到的 $\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1$ 为初始变化矩阵,由 $\mathbf{R}_1, \mathbf{T}_1, p_i$ 计算 $p_{i,1}$,并计算 $p_{i,1}$ 对应的 CAD 模型曲面的理论点 $q_{i,1}$,计算目标函数 J_1 ;

(2) $k \leftarrow k+1$;

(3) 求解变化矩阵 $\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k$,使得目标函数 J_k 最小;

(4) 由 $\mathbf{R}_k, \mathbf{T}_k, p_{i,k-1}$ 计算 $p_{i,k}$,并计算 $p_{i,k}$ 对应的 CAD 模型曲面的理论点 $q_{i,k}$,计算目标函数 J_k ;

(5) 如果 $(1 - J_k/J_{k-1}) \leq \delta_0$ 且 $J_k \leq \delta_1$ (δ_0, δ_1 均为预先指定的小的正数),进步骤(6),否则转步骤(2);

(6) 迭代停止,计算最终的旋转矩阵和平移矩阵,由上述计算过程可推出:

$$\mathbf{R} = \prod_{j=1}^k \mathbf{R}_j \quad (4)$$

$$\mathbf{T} = \prod_{j=2}^k \mathbf{R}_j \mathbf{T}_1 + \prod_{j=3}^k \mathbf{R}_j \mathbf{T}_2 + \dots + \mathbf{R}_k \mathbf{T}_{k-1} + \mathbf{T}_k \quad (5)$$

上述算法的关键是第(3)步中变化矩阵的计算,该计算是一个非线性求解问题,本文采用 Menq 算法^[12]来求解,该算法通过高斯-牛顿法来求解变化矩阵 \mathbf{R}_k :

$$\mathbf{R}_k = (\mathbf{P}\mathbf{P}^T)^{-1} \mathbf{P}\mathbf{Q}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = [\tilde{p}_1 \ \tilde{p}_2 \ \dots \ \tilde{p}_m]$$

$$\mathbf{Q} = [\tilde{q}_{1,k} \ \tilde{q}_{2,k} \ \dots \ \tilde{q}_{m,k}]$$

$$\tilde{p}_i = p_i - c_p, \tilde{q}_{i,k} = q_{i,k} - c_{q,k}$$

式中, c_p 为被测工件上原始测点集 p_i 的形心, $c_p =$

$[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{p_i} \ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{p_i} \ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_{p_i}]^T$; $c_{q,k}$ 为经过 k 次匹配后 p_i 所对应的 CAD 模型曲面的理论点集 $q_{i,k}$ 的形心,

$$c_{q,k} = [\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{q_{i,k}} \ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{q_{i,k}} \ \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m z_{q_{i,k}}]^T。$$

根据式(4)、式(5)得到的最终旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 即可得到 $\alpha, \beta, \gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z$,其中, α, β, γ 可由前述的 r_{ij} 计算公式得到:

$$\alpha = \text{atan}[2(r_{23}, r_{33})]$$

$$\beta = \text{atan}[2(-r_{13}, \sqrt{r_{23}^2 + r_{33}^2})]$$

$$\gamma = \text{atan}[2(r_{12}, r_{11})]$$

4 检测实例

以某一复杂型面工件的超声自动检测为例,图 4 为该工件的 CAD 模型图。为了更好地说明匹配效果,在该工件上以 $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 为间距进行采样,共计 14 条扫描线,每条扫描线上 17 个采样点。匹配前工件采样点与 CAD 模型理论点的对比如图 5 所示,图 6 为精匹配 ($m=15$) 后的对比情况。

为了评价匹配的误差,定义单个点的匹配误差,即匹配后采样点与 CAD 模型理论点的距离为 $e_t (e_t = \sqrt{e_{x_t}^2 + e_{y_t}^2 + e_{z_t}^2})$, $e_{x_t}, e_{y_t}, e_{z_t}$ 分别为 x, y, z 方向的偏差。使用最大误差 $e_{\max} = \max(e_t)$ ($t=1,2,\dots,n$) 和均方根差 $RMSE =$

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (e_t - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t)^2}$$
 来衡量匹配效果, n 为总

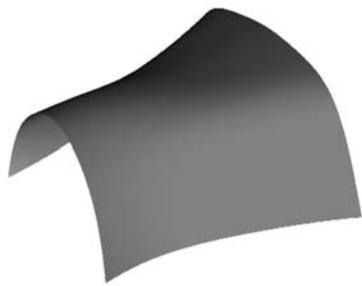


图 4 被测工件模型

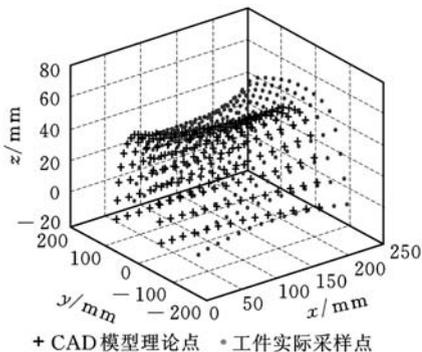


图 5 匹配前工件采样点与 CAD 模型理论点

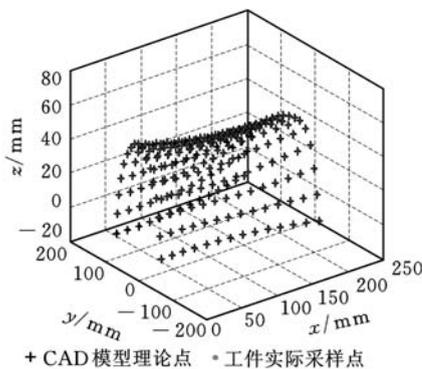


图 6 匹配后工件采样点与 CAD 模型理论点

的离散采样点数目。表 1 给出了匹配前、初始匹配以及 m 取不同值时精匹配的误差情况,以及得到的匹配变化矩阵中的旋转量和平移量。

表 1 匹配误差及旋转平移量

	e_{max} (mm)	RMSE (mm)	α (rad)	β (rad)	γ (rad)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)
匹配前	51.121	35.052						
初始匹配	8.711	0.612	0.203	0.066	0.234	26.901	-30.312	5.130
精匹配 ($m = 6$)	0.416	0.399	0.182	0.054	0.228	23.205	-32.968	3.018
精匹配 ($m = 10$)	0.190	0.127	0.178	0.055	0.226	23.125	-33.194	3.092
精匹配 ($m = 15$)	0.104	0.093	0.179	0.055	0.225	23.126	-33.233	3.091

由表 1 可见,初匹配后,最大误差由匹配前的 51.121mm 变成了 8.711mm,均方根差由 35.052mm 变成了 0.612mm,初匹配后得到的旋转量和平移量与精匹配结果已较接近,为后续精匹配计算提供了一个合理的初始矩阵,大大提高

了精匹配的计算效率。

且由表 1 可见,随着采样点数 m 的增大,匹配精度得到进一步提高。但同时随着 m 的增大,现场采样的时间和匹配计算的时间也随之延长。因此,为兼顾超声自动检测效率和精度, m 可取 6~10,如 m 取 6 时,精匹配的均方根差可控制在 0.4mm 内,已满足了超声自动检测的要求。

5 结语

为提高复杂型面工件超声自动检测的效率和通用性,在已知 CAD 模型数据情况下,利用工件上少量特征点与 CAD 模型对应点的初匹配定位和精匹配定位,可快速实现被测工件与 CAD 模型之间的准确匹配定位,从而可以利用 CAD 模型数据,实现复杂型面工件的超声自动化检测。检测实例表明,初匹配后可以得到较为合理的初始变化矩阵,提高了精匹配的计算效率。同时,在精匹配定位中,为兼顾超声自动检测效率和精度,采样点数应选择一个合适的值。本文的研究为实现复杂型面工件的超声自动检测中的匹配定位,改进超声自动检测工艺,提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] Ma H W, Zhang X H, Wei J. Research on an Ultrasonic NDT System for Complex Surface Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1/3):667-670.
- [2] 郑慧峰. 曲面复合材料工件超声自动检测中若干问题的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- [3] 吴思源, 周晓军, 江健, 等. 超声检测中曲面重构和路径规划方法研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(5):763-767.
- [4] 杜兴吉, 周晓军, 吴瑞明, 等. 超声检测中复杂曲面数字化方法研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(8):686-689.
- [5] Shigeo Nishioka, Koji Fushimi. Automatic Ultrasonic Testing Apparatus for Detecting Flaws of Structural Balls: US, 5184513[P]. 1993-02-09.
- [6] Deemer C M, Ellingson W A, Steckenrider J S. Method and Apparatus for Ultrasound Phased Array Testing of Bearing Balls: US, 7617733[P]. 2009-01-22.
- [7] Deng W, Shark L K, Matuszewski B J, et. al. CAD Model-based Inspection and Visualisation for 3D Non-destructive Testing of Complex Aerostructures[J]. Insight: Non-destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46(3):157-161.
- [8] Corke P I. A Simple and Systematic Approach to

基于 ASAP 架构的发动机 ECU 标定系统开发

庄继晖 谢 辉 李苏苏 朱仲文

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室,天津,300072

摘要:基于 ASAP 架构,设计开发了 A2L 数据交互描述、CCP 协议、KWP2000 协议,以及 HEX 标准存储格式等重要组件模块,实现了兼容多物理层和多协议层的发动机 ECU 标定系统。该系统在高压共轨柴油机及单体泵柴油机的开发过程中得到了成功应用,应用实践表明,该系统能够作为发动机标定开发中的重要工具。

关键词:CAN 标定协议;KWP2000 协议;ECU 标定;高压共轨柴油机

中图分类号:TK427

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.02.016

Development of ECU Calibration System for Engine Based on ASAP

Zhuang Jihui Xie Hui Li Susu Zhu Zhongwen

State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin, 300072

Abstract: This paper presented an ECU (electronic control unit) calibration system for engine based on ASAP (arbeitskreis zur standardisierung von applikationssystem) architecture, which was applied to multiple physical layers and protocol layers. A2L data description interpreter and CCP, KWP2000 components were developed. The given calibration system was applied to the development of CR diesel engine and EUP (electronic unit pump) diesel engine successfully. The practice shows that this system is universal and reliable to different ECU which supported common protocol and can used as an important tool for engine calibration.

Key words: CAN calibration protocol (CCP); keyword protocol (KWP) 2000; ECU calibration; common rail (CR) diesel engine

0 引言

为了提高发动机的经济性,减少排放,电子控制技术和高压燃油喷射技术已经广泛应用于柴油机。发动机 MAP 数据的准确性和精确度将最终决定发动机的各种性能,最优的 MAP 是通过经过反复的标定试验才能够获取的。在标定过程中,需要实时监控柴油机的工作状态,根据状态参

数修改 MAP 中的数据,实时监控及 MAP 标定都是由标定系统完成的。设计和实现通用型的发动机标定系统对缩短发动机开发周期,降低开发成本具有重要意义。国外的相关 ECU 开发工具链提供商采用国际标准协议开发的通用型标定系统,能够对任何支持标准协议的电控单元进行标定,具备良好的适用性。ETAS 公司开发的 IN-CA^[1]以及 VECTOR 公司开发的 CANAPE 是目前使用最为广泛的发动机 ECU 标定系统。国内的研究院所针对具体应用开发了发动机标定软

收稿日期:2011—09—08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA110112)

Assigning Denavit - hartenberg Parameters [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23 (3): 590-593.

[9] 李雄兵,杨岳,胡宏伟,等.面向超声检测的曲面自动测量[J].中南大学学报(自然科学版),2010,41(1): 194-200.

[10] Li Zexiang, Gou Jianbo, Chu Yunxian. Geometric Algorithms for Workpiece Localization [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 864-878.

[11] 严思杰,周云飞,彭芳瑜,等.大型复杂曲面加工工件定位问题研究[J].中国机械工程,2003,14(9):

737-740.

[12] Menq C H, Yau H, Lai G. Automated Precision Measurement of Surface Profile in CAD-directed Inspection [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(2): 268-278.

(编辑 张 洋)

作者简介:胡宏伟,男,1980年生。长沙理工大学汽车与机械工程学院讲师。主要研究方向为自动化检测与信息处理。发表论文16篇。李雄兵,男,1977年生。中南大学 CAD/CAM 研究所副教授。倪培君,男,1965年生。中国兵器科学研究院宁波分院研究员。王向红,女,1977年生。长沙理工大学汽车与机械工程学院讲师。