

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.05.15

基于工业大数据的车身激光焊接过程分析系统

宋宏伟, 钟 鸣

北京奔驰汽车有限公司, 北京 100176

摘 要: 由于轻量化及高生产效率的需要, 白车身激光焊接的应用种类复杂, 且应用范围十分广泛。但也因此, 在高生产节拍下激光焊接的质量特征提取及过程控制成为行业内的难点。激光焊接影响因素多, 分析过程复杂, 容易导致错误的工艺调整。一旦激光焊接出现质量问题, 极易导致批量质量事故。本研究基于工业大数据建立了多信息融合的激光焊接过程分析系统, 可以实时提取焊接质量特征信息, 筛选需要关注及调整的焊接过程。通过全连接神经网络深度学习模型, 自动化分析焊接过程中的问题并提供解决方案。该系统的应用为大规模激光焊接过程控制提供了可靠及高效的数字化工具, 且可以通过持续学习提高问题解决的准确度, 为后续更多功能的开发提供指导依据。

关键词: 激光焊接; 工业大数据; 分析系统; 焊接质量

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)05-0125-06

The Analysis System of Body-in-white Laser Welding Process based on Industrial Big Data

SONG Hongwei, ZHONG Ming

Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China

Abstract: Due to the need for lightweight design and high production efficiency, the application of laser welding in automotive body structures is diverse and extensive. However, this complexity presents challenges in extracting welding quality features and controlling the process at high production rates. The factors influencing laser welding are numerous, and the analysis process is complicated, which can lead to incorrect process adjustments. When laser welding quality issues occur, they can easily result in mass production defects. This study establishes a multi-information fusion laser welding process analysis system based on industrial big data, which can extract welding quality feature information in real-time and identify welding processes that require attention or adjustment. Through a fully neural network deep learning model, the system automatically analyzes problems in the welding process and provides potential solutions. The application of this system provides a reliable and efficient digital tool for large-scale laser welding process control, and it can continuously learn to improve the accuracy of problem-solving, thereby offering guidance for the development of additional functionalities in the future.

Keywords: laser welding; industrial big data; analysis system; welding quality

引用格式: 宋宏伟, 钟鸣. 基于工业大数据的车身激光焊接过程分析系统[J]. 电焊机, 2026, 56(5): 125-130.

Citation: SONG Hongwei, ZHONG Ming. The Analysis System of Body-in-white Laser Welding Process based on Industrial Big Data[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(5): 125-130.

0 引言

激光焊接作为一种高效且热源稳定的连接技

术, 具有热影响区小、焊接变形小、自动化程度高等优点^[1]。相较于点焊、MIG 焊等传统热连接技术, 激光焊接因其集中且可调的热量, 特别适用于有色金

收稿日期: 2025-02-27 修回日期: 2025-10-02

作者简介: 宋宏伟(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事车身连接技术研究。E-mail: songhongwei@bbac.com.cn。

属的焊接。然而,由于激光自熔焊光斑直径较小,焊接过程中热循环的升温与冷却速度极快,这使得研究熔池温度场、流场及温度场对材料影响的难度较大^[2],从而导致对焊接过程稳定性的影响因素不完全了解,增加了出现不受控焊接过程的风险。此外,激光焊接还面临焊接间隙适应性差、焊缝成分和组织控制困难等问题。尤其在工装夹具、拘束应力、板材尺寸、表面质量、母材成分等因素存在偏差时,容易导致焊接缺陷^[3]。因此,无论是在生产过程控制还是问题分析与解决方面,亟需一个集成激光焊接技术的信息分析系统。

与实验室采集数据不同,工业大数据呈现出数据量庞大、单一数据信息量低、数据波动大的特点^[4]。在焊接工艺过程控制的基础上,国内学者尝试通过自制软件与模块化设计,构建了以工控机、数据采集卡、信号调理卡和各类传感器为基础的信息采集平台,并设计了焊接过程及质量的在线监控与评价系统,探索了模块化设计方法在电阻点焊、螺柱焊等技术中的应用可行性^[5-6]。然而,激光焊接的信号探测更加复杂,且在工业生产中,焊件的受热变形、夹紧误差等多种不确定因素,往往导致实际焊缝轨迹与预设轨迹发生偏移。此时,机器人无法有效地实时自适应调整焊接轨迹,需要通过大数据技术分析原因并解决^[7]。此外,激光飞行焊、搭接焊、填丝焊和钎焊等工艺涉及的信号提取各不相同

且难度较大,至今尚未有完整的工业化应用系统。

1 车身激光焊接过程分析系统组成

1.1 质量特征参数的识别与提取

激光焊接在车身上的应用种类繁多,每种焊接方式所形成的焊缝形貌及质量要求各不相同。因此,在进行质量特征参数的识别与提取时,应根据不同的焊接工艺和质量检测方式,选择能够反映相应质量要求的焊缝特征。

目前应用最为广泛的是激光飞行焊,即在可编程的聚焦镜组控制下,采用非接触方式进行的自熔焊,且不使用填充材料。车身在焊接过程中通常会使用镀锌钢板及5系铝合金进行激光扫描焊接,但对于特征参数的提取方法却完全不同。在激光焊接过程中,当激光束照射到镀锌钢板表面时,材料在激光作用下发生熔化和蒸发,产生的反冲压力足以克服液态金属的表面张力和重力,从而形成一个类似锁眼的小孔,这显著提高了激光的吸收效率。因此,如图1a所示,通过对正向熔池的红外图像进行提取,结合数字图像相关技术,可以有效滤除杂波,并提取出焊接质量的关键特征^[8]。经过研究,以最大梯度确定的熔池轮廓的灰度积分值、熔池中心的灰度积分值以及低于设定灰度阈值的孔面积,均可作为表征焊接连接质量的有效提取参数。

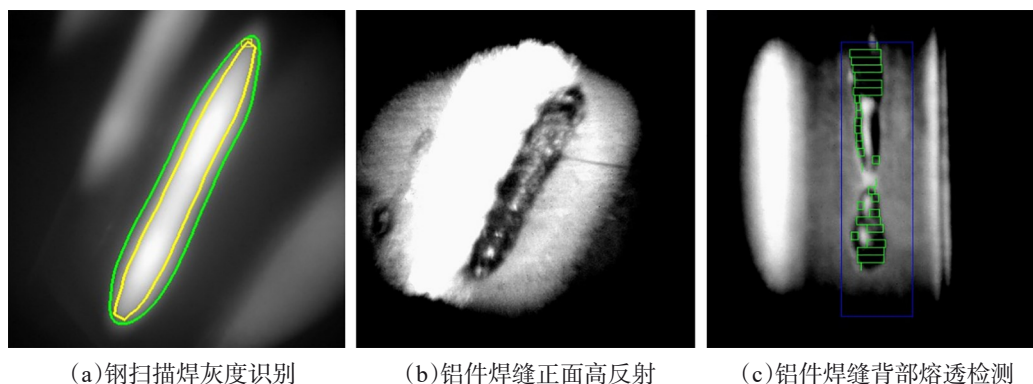


图1 激光飞行焊探测示意

Fig. 1 Schematic of laser scanning welding detection

对于铝合金的激光飞行焊接,由于母材对红外激光的反射率非常高,正面拍摄时会受到严重干扰,因此无法从正面提取红外信号特征,如图1b所示。实际应用中,通常通过蓝光照明对背部熔穿情

况进行拍照识别,并通过背透面积估算焊缝的连接状态,如图1c所示。

对于激光搭接焊、激光填丝焊和激光钎焊,目前主要通过表面形貌测量来检测焊缝质量。通过

测量焊缝的凸起高度、孔洞尺寸、焊缝长度等参数,可以评估焊缝的尺寸是否符合质量要求。而焊接强度的表征仍然以破坏性截面测量为主。对于激光搭接焊,由于集成了“Seam-line-remote”焊接区域自动识别、纠偏及检测功能模块,可以确保焊接位置处于搭接位置中心,因此可以通过对纠偏参数的提取,实时监控焊接位置的偏移状态。

1.2 分析系统数据集成架构

为实现复杂系统的数据提取、汇总、分析及输出,所有编程工作均通过Python语言完成。该系统的整体结构如图2所示,系统结构共分为四大模块:

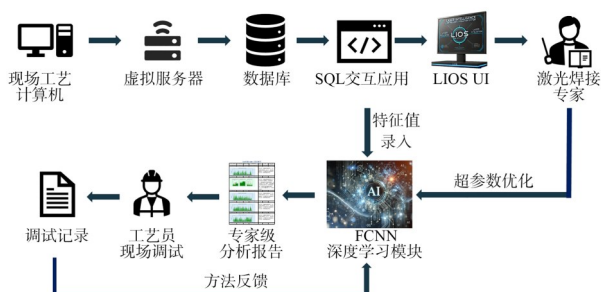


图2 分析系统数据集成架构示意

Fig. 2 Schematic of Analysis System Data Integration Architecture

(1)数据提取模块:在生产线网络中搭建数据采集服务器,并在服务器上开发扫描程序,持续监控焊接工艺计算机,以提取焊接过程和质量数据,分类存储于虚拟机的数据库中,形成原始数据池。该数据池包括了激光焊接质量结果中识别出来的质量特征参数、在线监控参数阈值、激光焊接设置参数等,以供后续分析计算。

(2)数据信息趋势汇总模块:通过监控趋势程序模块,对质量信息进行关键数据提取及汇总,形成数据流。数据流格式为可供分析模块直接提取的SQL数据库。

(3)数据分析模块:筛选上一生产周期内排名显著的数据点,进行趋势及参数分析,生成专家级分析报告,并自动发送给需要的人员。

(4)数据显示及操作模块:通过LIOS UI软件,激光专家可以分析所有系统参数及趋势,进而优化数据分析模块,使分析过程更具指导意义。

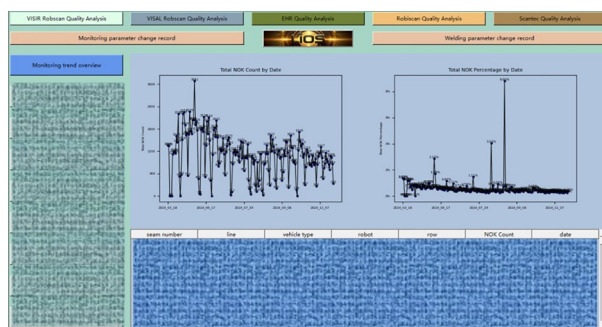
以上数据提取模块、数据信息趋势汇总模块和数据分析模块均运行于工作站中,面向用户输出分析报告。LIOS UI软件可开放给用户,用于辅助分

析及汇总报告。通过如上架构配置,能够实时提取生产现场所有激光焊接特征信息并进行分析,最终输出专家级报告以指导现场工艺调试。

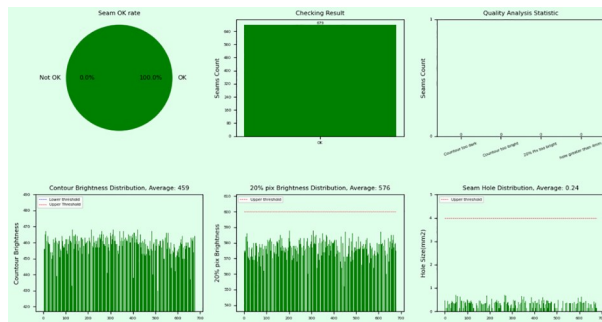
1.3 质量参数可视化界面

为分析焊接质量数据与根本原因及调整内容之间的相关性,需构建一个集成的可视化界面,以支持激光焊接专家优化全神经网络分析模块的超参数,从而使专家级分析报告更具指导意义。LIOS UI可视化界面汇总了多种激光焊接技术的信息,界面布局如图3a所示。当点击左侧按钮时,界面中央将显示相应的趋势信息。该界面包含以下内容:缺陷率的每日趋势、问题数的每日趋势、所有焊缝的焊缝号、线体号、车型、机器人号及缺陷数等信息。焊缝按照缺陷数的大小进行排序,当点击任意焊缝时,界面将自动展示该焊缝的缺陷率及问题数的每日趋势。该系统还具备每种连接技术的质量参数汇总和分析功能,能够基于大数据计算每项参数的平均值及合理的公差范围,相关信息如图3b所示。

当在分析主界面仅输入日期而未指定焊缝号和线体号时,系统将显示当日的质量分布状态;若输入了日期、点号及线体号,软件将跳转至当天的



(a)主界面及状态趋势



(b)参数分析界面

图3 LIOS UI可视化界面

Fig. 3 LIOS UI Visual Interface

质量检测结果汇总界面,显示包括合格率、缺陷种类及数量以及各检测参数的分布情况。点击“智能分析”按钮后,系统会进入分析界面,基于当天的数据推导出问题原因,并给出相应的解决方案。

2 基于深度学习的激光焊接分析报告

为了实现快速分析和预测,本次研究采用了全连接神经网络模型,通过线性变换和非线性激活函数来学习数据中的特征。全连接神经网络通常由多个层级组成,每一层的神经元都与上一层的所有神经元相连接。该网络的基本结构包括:

输入层:接收原始数据(如图像、文本等)。

隐藏层:通过加权和激活函数来学习输入数据的特征。

输出层:给出最终的预测结果,如分类标签或回归值。

每一层的神经元数量和连接权重决定了模型的容量和表达能力。“全连接”指的是每一层的每个神经元都与前一层的所有神经元连接。

在本系统的深度学习模块中,数据预处理通过对特征数据进行标准化,使数据的均值为0,方差为1,从而有助于提高训练效果。模型结构使用了一个简单的全连接神经网络(FNN),并且可以根据数据量和复杂度调整网络结构。具体结构如下:

第一层:输入层,64个神经元,使用ReLU激活函数。

第二层:隐藏层,32个神经元,使用ReLU激活函数。

输出层:根据分类的类别数,使用Softmax激活函数进行多分类。

在模型训练与评估方面,采用类别交叉熵作为损失函数,适用于多分类问题。在训练过程中,使用训练集和验证集进行评估,并绘制准确率曲线。对于优化建议,基于模型输出的分类结果,可以给出具体的优化方案。

在实际应用中,系统通过分析每班次几百次焊接过程所形成的质量数据,判断输出状态,并通过重复学习这一过程来优化输出结果。这种方法有效解决了在激光焊接场景下,多变量输入与输出之间的映射关系问题,为稳定性控制提供了新思路。

3 车身激光焊接过程分析系统的现场应用

激光焊接分析系统的建立与实施,为现场趋势监控和根本原因分析提供了快速、准确的手段,为解决现场问题提供了极大便利,是一个实用性很强的数字化工具。

3.1 探测照明模块污染问题识别

在进行激光焊接时,由于热冲击导致的飞溅污染照明模块,会导致模块表面出现污染,从而影响透光效率。此问题的发现来源于对典型的铝激光焊接熔透状态的大数据分析。如图4所示,由于照明不足,导致背部熔透长度的识别经常低于2 mm,而实际焊接熔透长度超过4 mm,连接宽度更是超过16 mm。此类缺陷的特征为熔透识别的长度不稳定,部分很低,而部分可以满足要求。此种情况与光路污染导致的实际熔深不足有本质的区别。原因在于照明由于污染出现的不稳定,与每个件的表面状态和实时照明状态相关,时好时坏。而光路因污染等原因造成的功率不足则体现的是熔透不足,

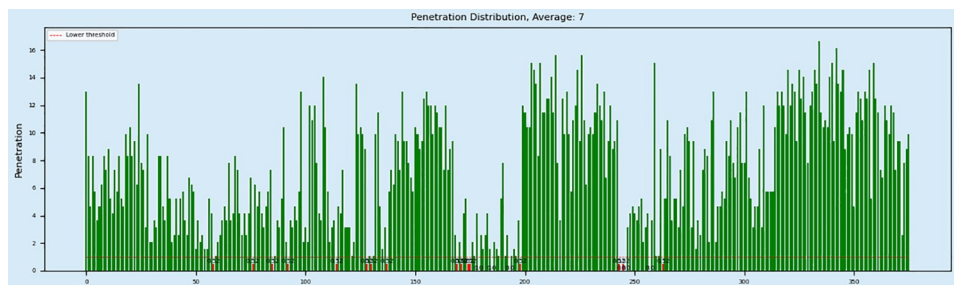


图4 探测照明模块污染问题熔深趋势

Fig. 4 Penetration of the contamination issue of the detection lighting module

如图5所示。根据特征值的变化形貌可以有效识别问题原因,对于此类问题的分析匹配度可达97%。

3.2 板间隙匹配超差问题识别

激光焊接对板间隙的要求很严格,对于板厚0.8 mm的母材,其标准为 0.15 ± 0.05 mm。板间凸点可以支撑起板间隙,这要求外部夹具对板件压紧。激光焊是单向成型技术,通常应用在内表面无可达性的区域,因此夹具也是由上层板单面压紧。当板

间隙大于0.3 mm时,会出现明显的表面塌陷,或者单面击穿。如图6所示,为通过系统统计出的典型板间隙匹配超差问题特征值分布情况。在此种情况下,边缘亮度值及中心亮度值会低于标准亮度5%以上,中心孔面积会出现大幅波动。因为板间隙在夹具松动或不合适的板件配合的情况下,会受每个零件的实际尺寸波动影响。故根据特征状态可以做相应的间隙优化工作。

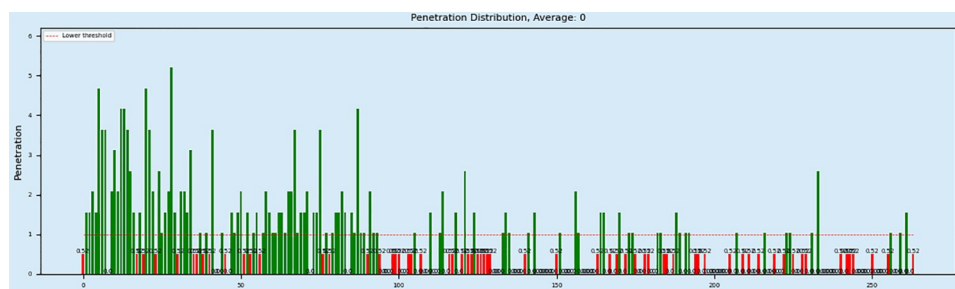


图5 光路污染导致功率不足问题熔深趋势

Fig. 5 Penetration of the power decrease by light path pollution

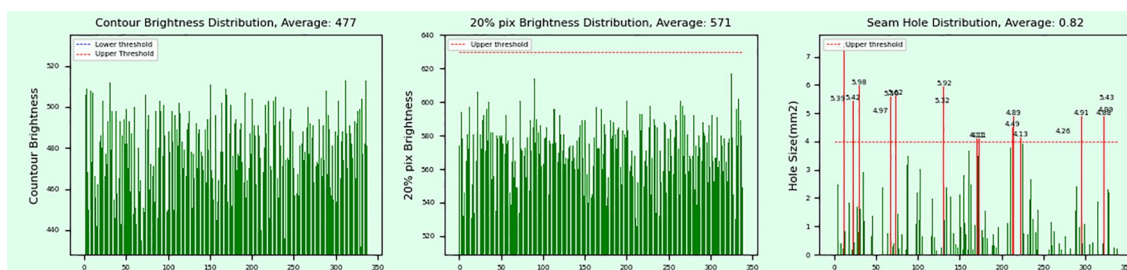


图6 板间隙匹配超差问题特征值分布

Fig. 6 Distribution of eigenvalue for plate gap mismatch problem

3.3 等离子体干扰问题识别

激光焊接过程中功率密度很高,当激光照射到金属表面时,金属原子或分子吸收激光能量后发生气化,形成高温金属蒸气。这些蒸汽中的自由电子通过逆韧致辐射吸收能量,并与金属蒸气 and 周围气体碰撞、电离,形成等离子体。如果等离子体过于强烈,会吸收和散射激光能量,导致激光能量的损失,影响焊接质量。强烈的等离子体会干扰激光束的传输和聚焦,可能导致焊接过程中出现缺陷或质量问题。在生产过程中,可以通过侧向气刀和纵向气帘将激光头和工件表面间的等离子体吹散从而保证工件的吸收率。

当吹气装置出现问题导致等离子体对焊接过程造成干扰时,会出现两种特征情况。首先,由于等离子体吸收激光形成红外辐射,导致拍照时图片

出现背景干扰光,使得边缘亮度和中心亮度均呈现不规则的大幅提高。其次,由于到达工件表面的能量显著降低,从而使得母材无法快速形成小孔增加熔深,热量停留在上板使材料过热出现单面击穿,如图7所示。此种情况通过系统快速报警修复,可消除由此带来的质量风险,并且极大地降低了问题解决时间。

4 结论

本研究通过建立多信息融合的激光焊接过程分析系统,对大规模激光生产过程的参数分析及质量控制提出了创新的解决方案,为解决现场问题提供了极大便利,是一个实用性很强的数字化工具。在系统应用后,3个月内生产报警数下降55%,及时

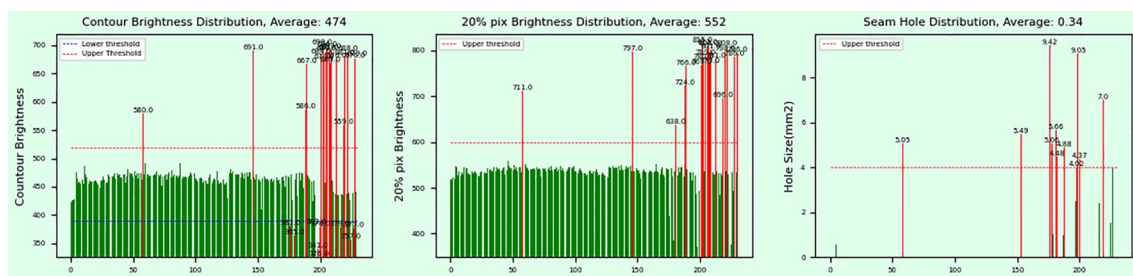


图7 等离子体干扰问题特征值分布

Fig. 7 Eigenvalue distribution for plasma interference problem

发现影响产品质量的偏离因素17次。目前该系统对于污染、间隙等问题的识别率很高,后续对于激光焊接的更为准确的分析及方法输出,有赖于基于图像的卷积神经网络等更多信息输入和复杂训练方法的深度学习模块,以更为细化现场工况的实时变化,便于采取更为高效精确的调整内容。

参考文献:

- [1] 刘浩东,戴京涛.激光焊接技术的应用研究进展与分析[J].电焊机,2022,52(1):95-102.
LIU H D, DAI J T. Research Review and Analysis of Laser Welding Application [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(1): 95-102.
- [2] 皮智谋.几种先进的焊接技术研究现状综述[J].热加工工艺,2013,42(23):8-13.
PI Z M. Research Review of Several Advanced Welding Technology [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(23): 8-13.
- [3] 郭东栋,张晓乐,邹尚博,等.基于大数据技术的电极修磨质量智能预警系统建立与应用[J].电焊机,2022,52(10):95-100.
GUO D D, ZHANG X L, ZOU S B, et al. Establishment and Application of Intelligent Warning System for Tip Dressing Quality Based on Big Data Technology [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(10): 95-100.
- [4] 周磊.基于工业大数据的电阻焊过程稳定性监测研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
ZHOU L. Research On Process Stability Monitoring Of Resistance Welding based on Industrial Big Data [D], Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [5] 魏雷.点焊质量监控系统的设计[J].山西大同大学学报(自然科学版),2019,35(4):76-78.
WEI L. Design of Monitoring System for Spot Welding Quality [J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2019, 35(4): 76-78.
- [6] 于永庆.电阻点焊生产信息化系统[J].科学技术创新,2020(06):155-156.
YU Y Q. Resistance spot welding production information system [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(06): 155-156.
- [7] 王斌.基于深度学习的激光焊缝识别与跟踪系统研究[D].南京:南京林业大学,2023.
WANG B. Research on Laser Weld Seam Recognition and Tracking System based on Deep Learning [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [8] 宋宏伟,王龙,张秋花,等.白车身激光扫描焊熔池边界提取与缺陷识别的研究[J].汽车工程,2020,42(3):401-405.
SONG H W, WANG L, ZHANG Q H, et al. Study on Boundary Extraction and Defect Identification of Molten Pool in Laser Scanning Welding of Body-in-white [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(3): 401-405.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>