

金属板材拉深智能化控制系统

杨 嵩, 赵 军, 马 瑞, 苏春建

(秦皇岛燕山大学机械工程学院 河北 秦皇岛 066004)

【摘要】运用能量法,建立了板材拉深过程完整的力学模型。针对板材拉深成形中起皱和破裂的具体情况,定量分析了板材起皱和破裂的失稳判据。确定板材成形的压边力三极限,并推导出板材成形的优化压边力控制规律。运用神经网络实现了板材材料性能参数的实时识别和压边力优化曲线的实时预测。利用LabVIEW软件编译了智能控制系统程序,采用基于虚拟仪器技术和产品,建立板材智能化拉深控制系统,实现板材成形的智能化。

关键词 拉深; 智能化; 神经网络; 金属板材成形
中图分类号 TG386 文献标识码 A

Intelligent Control Technology for the Deep Drawing of Sheet Metal

YANG Song, ZHAO Jun, MA Rui, SU Chun-jian

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University Qinhuangdao Hebei 066004)

Abstract From the energy method, the mechanical model of the metal sheet deep drawing is built. The analytical rules for the wrinkling and rupture in deep drawing are derived. The three deformation limits of binder hold force are determined and a control rule of binder hold force is derived. Two neural network models are introduced to realize real-time identification of sheet metal parameters and real-time prediction of optimum binder hold force. Finally, an intelligent control program is established for intelligent press forming of deep drawing of metal sheets.

Key words deep drawing; intellectualization; neural network; sheet metal forming

板材成形是金属塑性加工领域的一大分支,在汽车、航空、仪表等工业领域占有重要的地位,其技术水平在某种程度上反映一个国家或地区的工业现代化水平。板材成形智能化的突出特点是,根据被加工对象的特征,利用易于监测的物理量,实时识别材料的性能参数,预测最优的工艺参数,并自动以最优的工艺参数完成板材成形。冲压智能化系统主要由实时监测、实时识别、实时预测和实时控制四个基本要素构成。

1 轴对称曲面零件和非轴对称零件拉深过程的力学模型

平底锥形件是轴对称拉深件中最典型的结构,平底锥形件变形前后的几何关系如图1所示。图中将变形过程中的工件分成 $0 \leq \xi \leq R_A$ 、 $R_A \leq \xi \leq R_B$ 、 $R_B \leq \xi \leq R_C$ 、 $R_C \leq \xi \leq R_D$ 、 $R_D \leq \xi \leq R$ (ξ 为变形过程中质点 x 的瞬时径向坐标)五个区域,并将接触面的摩擦进行简化,再引入直母线假设、面积不

变假设和似直梁弯曲假设,根据基本能量方程推导出拉深力-拉深行程曲线的解析表达式为^[1]:

$$P = \frac{C(\alpha)}{1 - \mu K_1(\alpha)} [\mu QF(\alpha) + 2wI(\alpha) + J(\alpha)] \quad (1)$$

式中各符号意义参见文献[1]。

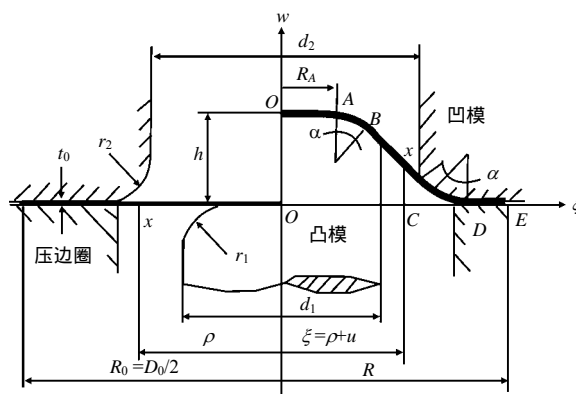


图1 锥形件拉深前后的几何关系

盒形件是非轴对称件的典型结构,从力的平衡方程得到盒形件拉深力-拉深行程曲线的解析式

收稿日期: 2007-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375136; 59875074)

作者简介: 杨嵩(1979-),男,博士,主要从事冲压工艺及智能化方面的研究。

为^[2]：

$$P = 4 \left(\int_0^{\theta_0} \sigma_p \xi t_0 \sin \alpha d\theta + \int_0^{\frac{\pi}{2}-\theta_0} \sigma_p \xi t_0 \sin \alpha d\theta + \int_0^{\frac{B_1}{2}} \sigma_y t_0 \sin \beta dx + \int_0^{\frac{A_1}{2}} \sigma_y t_0 \sin \beta dx \right) \quad (2)$$

式中 各符号意义参见文献[2]。

2 实时监测

拉深过程的实时监测就是采用有效的测试手段，实时监测能够反映被加工对象特征的宏观力学参量和几何参数。板材拉深时，拉深力 P 、压边力 Q 、拉深行程 h 三者是既能反映拉深过程特征又易于监测的物理量。所以，将模具和毛坯几何参数视为已知，将一个试压过程中在线监测获得的拉深力-拉深行程曲线作为识别材料性能参数和摩擦系数的原始依据。拉深力-拉深行程曲线的抽象表达式为：

$$P = f(h, Q, \frac{t_0}{D_0} \mu, n, B, r) \quad (3)$$

3 性能参数的实时识别

材料性能参数的识别是指对实时监测所获得的被加工对象的信息(拉深力、压边力、拉深行程)进行分析处理，结合知识库和数据库的已知信息，识别被加工对象的材料性能参数和工况参数，如硬化指数 n 、强度系数 B 、厚向异性系数 r 及摩擦系数 μ 等。即将一组实测数据 $(h_k, P_k, Q_k, K=1, 2, \dots, N)$ 作为实时监测量，识别材料性能参数和摩擦系数，确定式(3)中的非线性参数 $B = (\mu, n, B, r)$ ，使下述目标函数的值最小^[3]：

$$F(B) = \sum_{K=1}^N [P_K - f(h_K, Q_K, B)] \quad (4)$$

参数实时识别是拉深智能化更高发展阶段。随着计算机技术和人工智能科学的进步，神经网络模型成为实现智能拉深过程中参数实时识别的重要手段。运用神经网络技术，可以实现锥形件和盒形件的材料性能参数的实时识别。在神经网络识别模型中，采用了由Levenberg和Marquardt提出的LM算法。该算法是梯度下降法与高斯牛顿法的结合，既有高斯牛顿法的局部收敛性，又有梯度下降法的全局特性，可以有效地改善网络收敛性能。就训练次数及准确程度而言，LM算法明显优于BP算法及其BP的衍生法。根据式(3)，建立材料性能参数识别的神经网络拓扑结构。对于 $(h, P, Q, t/d)$ 作为系统可实时监

测的物理量，这四个量作为BP神经网络的输入；而 (B, μ, n, r) 这四个随材料型号、润滑条件不同而有波动的未知量作为输出变量。网络结构如图2所示。泛化后的材料性能识别精度，尽管摩擦系数的识别结果相对来说较为发散，但参数识别平均误差不超过3%^[4]，已经达到系统对于材料性能参数识别的精度要求。

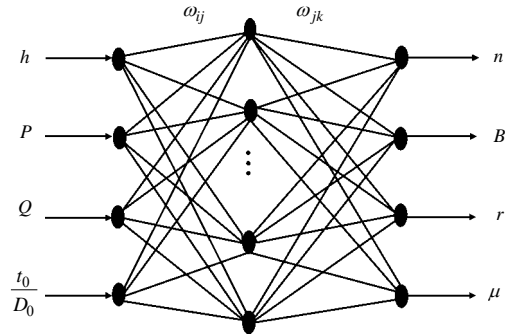


图2 性能参数识别的神经网络模型

4 拉深过程的控制规律预测

控制规律预测是根据识别所获得的材料性能参数和工况参数，以拉深成形的临界条件(法兰起皱、侧壁起皱及侧壁破裂)为依据，通过计算或通过知识库和数据库中的已知信息比较来预测拉深过程中的最佳工艺参数，并给出最佳压边力控制规律。

对于锥形件，可以得出如下三个拉深成形的临界压边力的理论计算公式。

从能量守恒的角度出发，考虑拉深过程中法兰起皱时三个方面的能量变化(即波纹隆起所需的弯曲功、周向应力因周长缩短而释放出的能量以及波纹隆起时压边力所消耗的功)，可以推导出考虑摩擦影响时法兰起皱的临界压边力的理论计算式为^[5]：

$$Q_{fwr} = \frac{3}{8} \pi r_0^2 B \frac{y_0}{t_0} F(n, m, \rho) F_m(\lambda_m) \quad (5)$$

式中 各参量的意义参见文献[5]。

依据板材失稳理论，通过对锥形件拉深过程的极限承载能力的分析，可以推导出拉深过程工件破裂的临界压边力变化规律为^[6]：

$$Q_{rup} = \frac{1}{\mu F(\alpha)} \times \left\{ \frac{2R_B}{R_B + R_C} \sigma_{B0} [1 - \mu K_1(\alpha)] - 2wI(\alpha) - J(\alpha) \right\} \quad (6)$$

式中 各参量的意义参见文献[6]。

对于侧壁起皱临界压边力 Q_{wwr} ，利用能量法导出了拉深力和压边力的关系，可以得到悬空侧壁无

皱临界压边力 Q_{wrt} 为^[7]:

$$Q_{\text{wrt}} = \frac{1}{\mu F(\alpha)} \left\{ \frac{P_{\text{wrt}} [1 - \mu K_1(\alpha)]}{C(\alpha)} - 2\omega I(\alpha) - J(\alpha) \right\} \quad (7)$$

式中各参数意义参见文献[7]。

根据上述三种临界条件,将图3划分为法兰起皱区、侧壁起皱区、工件破裂区和成功拉深区等四个区域。合理的压边力变化规律应在成功拉深区内。

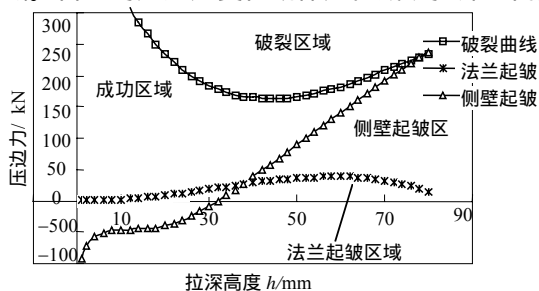


图3 CRS的成形三极限图

对盒形件法兰区的起皱判定,引入C-B准则^[8],可以得到单位面积临界压边力的计算公式为:

$$p = \frac{3Kt}{4(n+1)\delta} \left\{ \begin{array}{l} \left[\varepsilon_0 + c_1 \ln \left(1 - \frac{2u_x}{L} \right) \right]^{n+1} \\ - \frac{2}{L} \left[\frac{c_2 t}{2} + (\varepsilon_0 + c_3) \left(\frac{1}{m^2 \delta} + \frac{t}{2} \right) \right]^{n+1} \\ \left(\frac{1}{m^2 \delta} + \frac{t}{2} \right)^{-n} \tan^{-1}(m\delta) \end{array} \right\} \quad (8)$$

式中 各参数意义参见文献[9]。

对于法兰是否进入起皱状态,以下述两点假设作为判据:

(1) 法兰发生皱曲的必要条件是圆角区和直边区同时达到起皱临界条件。

(2) 直边区和圆角区起皱的临界条件是各自中心线上的点同时达到起皱临界条件。

5 拉深过程的实时控制

实时控制就是根据识别和预测所得的结果,根据最佳压边力规律自动完成拉深成形过程。根据前述的三个成形极限解析式,可以得到锥形件实际控制压边力规律为:

$$\eta_{\text{wri}} \max \{ Q_{\text{rwr}}(h), Q_{\text{wrt}}(h) \} = Q_{\text{opt}}(h) \quad \eta_{\text{rup}} Q_{\text{rup}}(h) \quad (9)$$

式中 H_Q 为压边力的成形极限高度; Q_{opt} 为最佳控制压边力; η_{wri} 为无皱曲安全系数; η_{rup} 为无破裂安全系数。针对具体的成形条件,适当地选择 η_{wri} 和

η_{rup} , 可使控制压边力更为合理,大大提高成形过程的稳定性和锥形件的极限拉深高度。

对于盒形件,根据盒形件破裂临界条件以及法兰失稳起皱临界条件,采用两段法确定压边力曲线的下载方式。开始阶段,采用不大于材料破裂曲线的最高压边力进行压边;第二阶段,采用高次曲线逼近破裂裕度曲线的方法,确定压边力加载曲线,其中破裂裕度曲线是在破裂临界曲线第基础上向下平移20 kN获得的。

6 板材智能化拉深系统

控制系统采用美国NI公司开发的虚拟仪器产品和技术,用LabVIEW软件编译了控制系统程序。板材拉深过程智能化控制系统的工作原理如图4所示。

该系统主要由四大部分构成:

(1) 过程监测部分:主要由传感器、A/D卡、工控机及采集、记录和显示程序组成,能够反映拉深过程特征的三个物理量有拉深行程 h 、拉深力 P 和压边力 Q ,被位移传感器和压力传感器分别转换成电压信号 V_h 、 V_p 和 V_Q 。三个电压信号经A/D卡将模拟量转换为数字量输入计算机。

(2) 参数识别部分:主要由计算机和相应的软件构成,采用神经网络模型,实现实时识别。

(3) 预测部分:根据识别所得到的材料性能参数和摩擦系数,发出控制信号 Q_c ,再用系统输出的标定曲线将其转换为控制电压信号 V_c 。D/A卡将控制电压信号的数字量转换成模拟量后进入比例放大器。比例放大器将控制电压信号 V_c 转换为控制电流信号 I_c 以控制比例溢流阀开启量的大小,从而达到控制压机顶出缸压力亦即控制压边力的目的,实现最佳压边力规律的预测。

(4) 实时控制部分:主要由工控机、D/A卡、比例放大器、比例溢流阀等组成,针对具体的成形条件,适当地选择成形参数,使压边力控制更为合理。

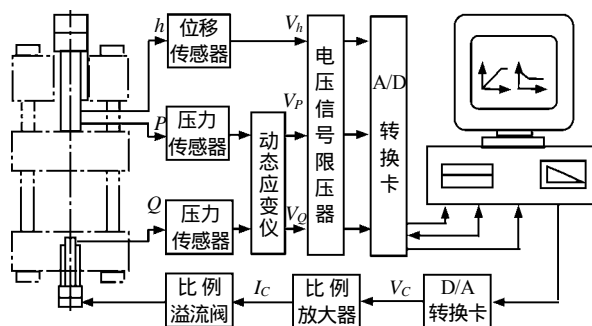


图4 智能化拉深系统工作原理

7 结 论

(1) 所建立的拉深过程解析模拟力学模型可给出较精确的拉深力-行程曲线。该模型可反映材料性能、摩擦、毛坯尺寸、模具尺寸等主要参数对拉深过程的影响规律。

(2) 采用神经网络识别模型可实现材料性能参数和摩擦系数的实时识别。因为识别参数过多,网络结构过于复杂,本文将非轴对称件的性能参数识别网络划分为两部分,极大地提高了识别效率和识别精度。识别材料性能参数的识别误差在1%以内,摩擦系数识别结果的平均误差不超过3%。

(3) 基于对板材拉深成形临界条件的理论分析和实验研究,分别针对锥形件和盒形件提出了临界载荷控制原理。按照变压边力规律控制拉深过程,可大幅度提高板材的极限拉深高度。

(4) 建立了板材智能化拉深实验系统,实现了板材拉深过程的智能化控制。

参 考 文 献

- [1] 赵 军, 秦泗吉. 轴对称曲面件智能化拉深成形过程的解析定量描述[J]. 塑性工程学报, 1998, 5(4): 47-58.
- [2] 赵 军. 盒形件拉深智能化控制关键技术研究[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(3): 67-70.
- [3] 赵 军. 锥形件智能化拉深系统中材料参数和摩擦系数的在线识别[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3): 48-52.
- [4] ZHAO Jun, WANG Feng-qin. Parameter identification by neural network for intelligent deep drawing of axisymmetric workpieces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 166(3): 387-391.
- [5] 赵 军, 张双杰. 拉深过程智能化控制中的法兰起皱临界条件[J]. 燕山大学学报, 1998, 22(3): 197-201.
- [6] 赵 军, 郑祖伟. 拉深过程智能化控制中的破裂失稳临界条件[J]. 燕山大学学报, 2000, 24(4): 330-337.
- [7] 潘文武. 圆锥形件拉深成形智能化控制中合理压边力规律[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2002.
- [8] CAO Jian, WANG Xi. An analytical model for plate wrinkling under tri-axial loading and its application[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2000, 42(3): 617-633.
- [9] 赵 军, 马 瑞. 盒形件法兰皱曲失稳的临界条件[J]. 锻压技术, 2006, 31(5): 124-126.

编辑 税 红

《电子科技大学学报》征订启事

创刊于1959年的《电子科技大学学报》,经教育部批准,为国家教育部校共办学术期刊,《电子科技大学学报》是全国最早电子类期刊之一,是以电子科学为主的综合性学术刊物。明年主要刊登:电子通信、电子测量、电视技术、生物电子学、雷达、电子对抗、遥控遥测、信息论、电磁场工程、天线、微波理论与技术、半导体物理与器件、电子材料与元件、电子机械、自动控制、神经信息科学与技术、生物医学信息技术、生物物理科学与技术、电子物理与器件、激光与光纤技术、计算机科学与技术等基础科学理论和应用科学技术的学术论文;科研成果的学术性总结;新技术、新工艺的论述;国内外科技动态的综合评述;不同学术观点的争鸣等。阅读对象主要是从事上述学科、专业类的教学、科研人员、研究生、大学本科生及工程技术人员。

《电子科技大学学报》2次荣获“全国优秀科技期刊评比”二等奖;1次荣获教育部“全国高校自然科学学报评比”二等奖(属科技进步奖);4次荣获“四川省优秀期刊评比”一等奖,同时获“四川省十佳期刊”称号;2次荣获国家教委“全国高校自然科学学报系统优秀学报评比”一等奖,1次荣获国防科工委“八五优秀国防科技期刊”称号;2次荣获“四川省高校优秀学报评比”一等奖;4次荣获电子工业部“优秀科技期刊评比”一等奖;2次荣获信息产业部“精品期刊”称号;2001年《电子科技大学学报》进入了国家“双百期刊”方阵,在该方阵排名第22位,在全国4 780多个自然科技期刊中总排名第120位;2002年获第二届国家期刊奖提名奖;2006年荣获首届中国高校优秀科技期刊奖。

《电子科技大学学报》被美国《工程索引》的Ei Page One数据库、美国《数学评论》、美国《CAS》、英国《INSPEC》、德国《数学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、国内的《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析》等20个数据库和文摘杂志摘录。

《电子科技大学学报》为双月刊(单月30日出版),大16开本,每期10个印张,约30万字左右,国内外公开发行,国内单价每册0.00元,需订阅《电子科技大学学报》的单位和个人,请向当地邮局办理订阅手续。

亲爱的读作者,欢迎您继续订阅《电子科技大学学报》,愿她在您攀登祖国电子科学高峰的征途上发挥积极作用。

国内发行代号:62-34 国外发行:中国出版对外贸易总公司(北京782信箱)

本刊通信地址:成都市建设北路二段4号《电子科技大学学报》编辑部 邮政编码:610054

电话:028-83202308 E-mail:xuebao@uestc.edu.cn 网址:http://www.xb.uestc.edu.cn