

轮式联合收获机转向桥壳优化设计*

马丽娜 毛恩荣 朱忠祥 宋正河

(中国农业大学现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对联合收获机3种典型工况下的转向桥壳进行受力分析。研究了转向桥壳常用的几种截面形式对其强度和刚度的影响,提出了一种转向桥壳优化设计方法。利用ANSYS对某型号联合收获机转向桥壳进行了强度和刚度分析,并对其截面形式和尺寸进行了优化设计,优化设计后的转向桥壳不仅满足许用强度和刚度的要求,而且最大程度地减小了转向桥质量,比原设计下降了17.8%,并提高了加工制造性。同时,对转向桥壳应力集中出现的原因进行了分析并提出了工艺优化方案。

关键词: 轮式联合收获机 转向桥壳 优化设计 应力集中

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0283-05

Optimized Design of Steering Axle Housing for Wheeled Combine Harvester

Ma Li'na Mao Enrong Zhu Zhongxiang Song Zhenghe

(Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Three typical work conditions were chosen to analyze the forces of steering axle housing of wheeled combine harvester. The effect of different section forms of wheeled combine harvester on strength and rigidity of steering axle housing were studied. Then, the optimized design method of steering axle housing was put forward. The strength and rigidity of steering axle housing for a certain type wheeled combine harvester were analyzed in ANSYS. Meanwhile, its section forms and dimensions were optimized. The improved steer axle housing not only satisfied the demand of strength and rigidity, but also reduced its weight by 17.8%, and enhanced its manufacturability at the same time. The reasons for stress concentration were studied and the optimization processes were proposed.

Key words: Wheeled combine harvester Steering axle housing Optimized design Stress concentration

引言

联合收获机械转向桥不仅要承受自身及以上各总成的质量,还要承受侧向力、纵向力以及由不平地面引起的冲击载荷等^[1]。所以,转向桥壳必须具有足够的强度和刚度,以及一定的抗冲击性能。国内主要利用有限元法和实验法对载货车、轿车、农用运输车等车桥壳体的强度和刚度进行分析^[2-7]。吴春虎等^[2,4]对车桥壳体的厚度进行了轻量化设计。国

外主要对车桥壳体进行有限元分析,在结构和材料等方面对其进行优化^[8-9]。由于轮式联合收获机作业工况比较复杂,目前尚未形成一套其优化设计的方法,本文旨在满足3种典型工况下转向桥壳强度、刚度要求,提出一种转向桥壳优化设计方法。

1 力学分析

1.1 转向桥受力分析

轮式联合收获机转向桥通过车轮与路面相互作

收稿日期: 2013-06-26 修回日期: 2013-07-10

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B01)

作者简介: 马丽娜, 博士生, 主要从事农业机械底盘快速设计及仿真分析研究, E-mail: sunnylina@163.com

通讯作者: 宋正河, 教授, 博士生导师, 主要从事车辆人机工程与智能控制研究, E-mail: songzhenghe@cau.edu.cn

用,在不平路面高速行驶、碰撞障碍物以及侧滑 3 种工况下,转向桥壳承受的冲击最大。因此,选取以上 3 种工况进行强度和刚度计算。3 种工况下转向桥的受力简图如图 1 所示。

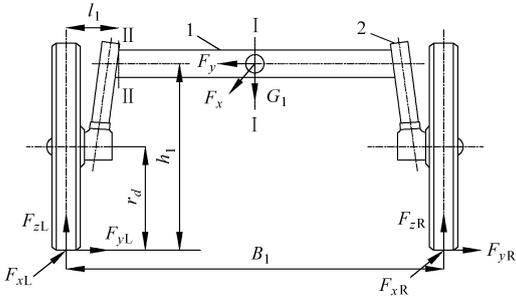


图 1 轮式联合收获机转向桥壳受力示意图

Fig.1 Sketch of forces on steering axle housing of wheeled combine harvester

1. 转向桥壳中间梁 2. 转向桥壳两端立轴壳焊合

图中 G_1 ——静止时整机作用在转向桥上的垂直载荷, N

F_x ——作用在转向桥上的纵向力, N

F_y ——作用在转向桥上的侧向力, N

F_{zL} 、 F_{zR} ——地面作用在左侧、右侧车轮上的垂直力, N

F_{xL} 、 F_{xR} ——地面作用在左侧、右侧车轮上的纵向力, N

F_{yL} 、 F_{yR} ——地面作用在左侧、右侧车轮上的侧向力, N

h_1 ——转向桥壳中心线高度, mm

B_1 ——转向桥轮距, mm

工况 1: 轮式联合收获机在不平路面上高速行驶工况, 转向桥主要承受垂直动载荷, 侧向力 F_y 和纵向力 F_x 可忽略不计。

地面作用在左、右转向轮上的垂直力为

$$F_{zL} = F_{zR} = \frac{K_D G_1}{2} \quad (1)$$

其中 $G_1 = (1 - \lambda_0) G = (1 - \lambda_0) m_{\text{smax}} g$

式中 m_{smax} ——轮式联合收获机整机最大质量, kg

λ_0 ——质量分配系数

K_D ——动载荷系数, 轮式联合收获机一般为 1.5 ~ 1.8^[10]

工况 2: 转向轮碰撞障碍物工况 (转向轮驶过田间沟垄等情况), 转向轮受到纵向力 F_{xL} 和 F_{xR} 的作用, 侧向力 F_{yL} 和 F_{yR} 忽略不计。

$$F_{xL} = F_{xR} = \phi \frac{Q_\phi}{2} \quad (2)$$

其中 $Q_\phi = 0.8 m_{\text{smax}} g$

式中 ϕ ——驱动轮附着系数, 取 0.65

Q_ϕ ——驱动轮附着重力, N

由经典力学理论可知, 工况 1 和工况 2 转向桥壳中间梁 I-I 截面处承受力矩最大, 是危险截面。

工况 3: 侧滑工况 (转弯, 左、右转向轮不在同一水平面上行驶等情况), 地面作用在转向轮上的侧向力 F_{yL} 和 F_{yR} 达到最大值, 纵向力 F_{xL} 和 F_{xR} 忽略不计。

向左侧滑时, 地面作用在左、右转向轮上的垂直力分别为

$$F_{zL} = 0.5 G_1 \left(1 + \frac{2\phi_y h_1}{B_1} \right) \quad (3)$$

$$f_{zR} = 0.5 G_1 \left(1 - \frac{2\phi_y h_1}{B_1} \right) \quad (4)$$

地面作用在左、右转向轮上的侧向力分别为

$$F_{yL} = \phi_y F_{zL} \quad (5)$$

$$F_{yR} = \phi_y F_{zR} \quad (6)$$

式中 ϕ_y ——转向轮侧向附着系数

1.2 不同截面形式转向桥壳力学性能分析

轮式联合收获机转向桥壳通常采用空心薄壁结构。其截面结构形式有钟形、矩形、梯形、圆形等, 如图 2 所示。

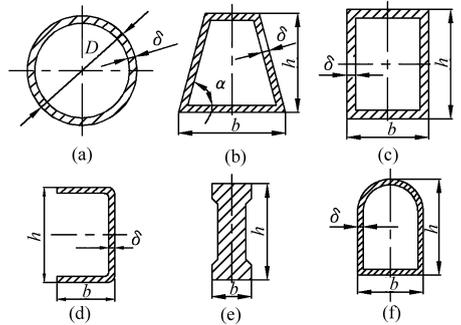


图 2 轮式联合收获机转向桥壳截面结构形式

Fig.2 Section forms of steering axle housing

(a) 圆形 (b) 梯形 (c) 矩形 (d) 槽形
(e) 工字形 (f) 钟形

在保证各截面结构形式具备相同的截面面积, 施加相同的载荷下, 对 3 种工况分别计算其应力、变形量, 计算结果如图 3、4 所示。综合应力、变形量曲线图可以看出, 工字形截面最优, 但是使用时多采用变截面处理, 因为转向桥壳两端焊合处应力集中严重。转向桥壳中间梁一般多采用钟形、矩形及圆形截面, 综合两曲线图和加工制造性, 优先选用矩形截面。

2 优化设计流程

结合设计理论及专家经验, 归纳出轮式联合收获机转向桥壳的优化设计流程, 如图 5 所示。

根据轮式联合收获机转向桥轮距、离地间隙, 确定出转向桥壳的长度、高度。其转向桥壳多采用型钢、铸钢、碳素结构钢制成。根据同系列机型, 应用

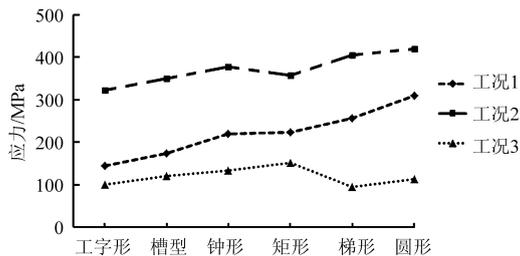


图 3 相同截面积不同截面形式在同等载荷下的应力

Fig. 3 Stress curves under different conditions

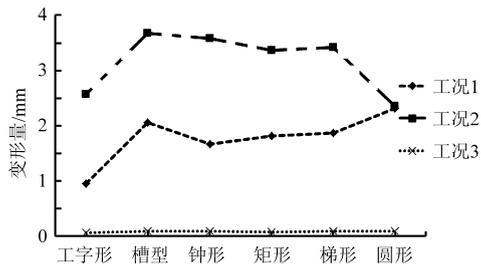


图 4 相同截面积不同截面形式在同等载荷下的变形量

Fig. 4 Deformation curves under different conditions

图 3 应力、图 4 变形量,合理选择转向桥壳截面形式,从而初步确定出转向桥壳结构参数。根据整机质量和重心位置,利用 ANSYS 对其 3 种典型工况下强度和刚度进行分析,如满足强度要求且具备优化裕度,则再进行优化。从而完成转向桥壳的最终优化的目标。

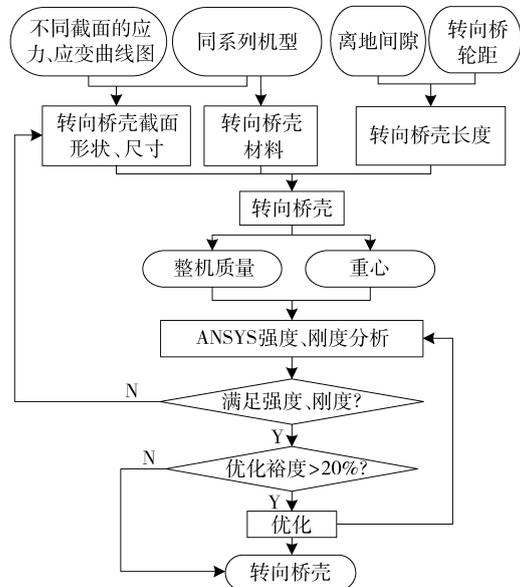


图 5 转向桥壳优化设计流程图

Fig. 5 Flow chart of optimized designing steering axle

3 优化设计

3.1 现有机型转向桥壳强度、刚度分析

选用某联合收获机转向桥壳进行分析,其结构如图 6 所示。整机质量为 4.3 t,转向桥壳中间梁截

面形式为钟形,截面尺寸如图 7 所示,其轮距为 1 500 mm,离地间隙为 550 mm。

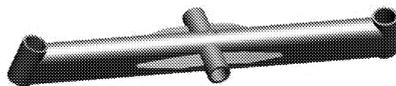


图 6 某联合收获机转向桥壳三维模型

Fig. 6 3-D model of steering axle housing for a certain type combine harvester

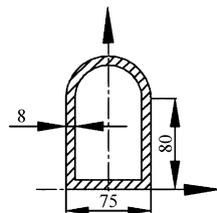


图 7 转向桥壳截面形式

Fig. 7 Section forms of steering axle housing

该款转向桥壳采用碳素结构钢 Q235,屈服强度 $\sigma_s = 215 \sim 235$ MPa,取 $[\sigma] = 220$ MPa,弹性模量 $E = 207$ GPa,泊松比 $\mu = 0.3$,密度 $\rho = 7.9 \times 10^3$ kg/m³。

为研究转向桥壳的力学性能,先用 Pro/E 绘制转向桥壳的三维模型,然后导入 ANSYS 进行有限元分析,单元类型采用 SOLID185。

作用在转向桥壳上的力通过车轮与地面的相互作用传递到转向桥上,所以须将作用在车轮上的力和约束转移到转向桥壳上。为了使实体模型载荷独立于有限元模型且加载操作方便,在加载完成之后再对实体模型进行网格划分。基于此,本文采用自由网格划分方法。

3 种工况下,该款联合收获机转向桥壳 ANSYS 分析应力云图如图 8 所示。

3.2 现有机型转向桥壳结构改进

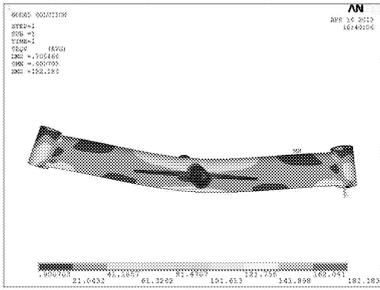
该联合收获机转向桥壳采用钟形截面,综合应力、变形量图可知,矩形截面优于钟形截面,所以将其截面设计为矩形,其长度和宽度根据原机型转向桥壳截面值近似确定,如图 9 所示,其三维模型如图 10 所示。利用 ANSYS 进行力学分析,其应力云图如图 11 所示。

3.3 改进前后转向桥壳强度、刚度对比

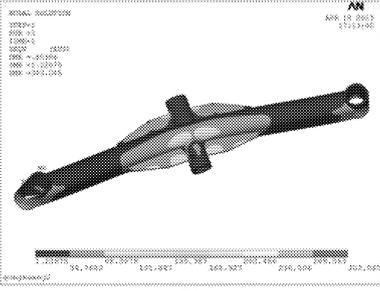
由改进前、后 ANSYS 分析应力云图可得,该转向桥壳在 3 种工况下危险截面应力、变形量如表 1 所示。3 种工况下,改进后的转向桥壳在危险截面处的应力、变形量均下降,说明改进后的转向桥壳强度、刚度明显增强。

3.4 现有机型改进后的转向桥壳设计优化

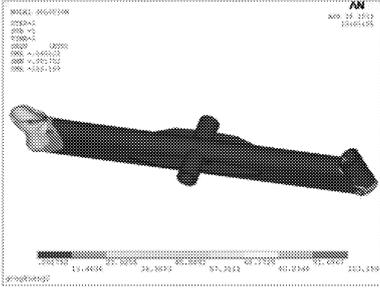
由 ANSYS 分析结果可知,改进后的转向桥壳在工况 2 下工作时,危险截面 I-I 处的最大应力为 158.9 MPa,最大许用应力 $[\sigma]$ 为 220 MPa,优化裕度



(a)



(b)



(c)

图8 现有机型转向桥壳应力云图

Fig. 8 Stress distribution on existing steering axle housing

(a) 工况1 (b) 工况2 (c) 工况3

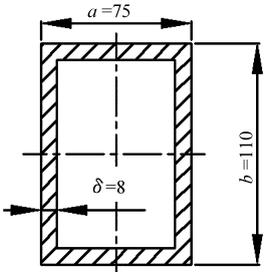


图9 某款联合收获机转向桥壳改进后截面

Fig. 9 Improved section form of steering axle housing for a certain type combine harvester

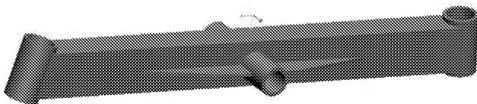


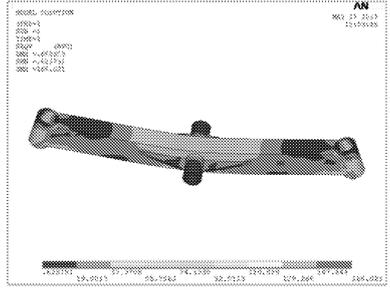
图10 某款联合收获机改进后的转向桥壳三维模型

Fig. 10 3-D model of improved steering axle housing

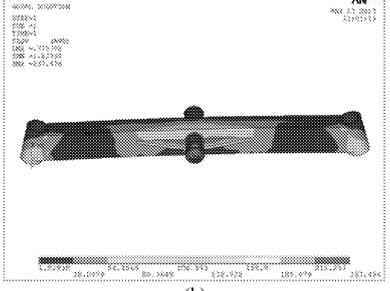
为27.8%，所以可以将该转向桥壳进一步优化。

保证转向桥壳截面厚度不变，优化其长度 b 和宽度 a ，使转向桥壳在满足强度、刚度的条件下，质量最小。

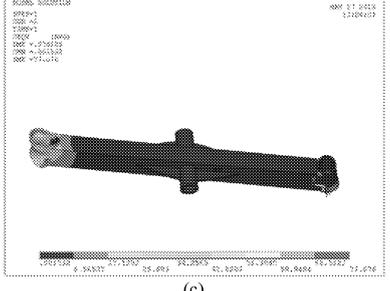
以 a 、 b 为设计变量，以转向桥壳质量 W 为目标



(a)



(b)



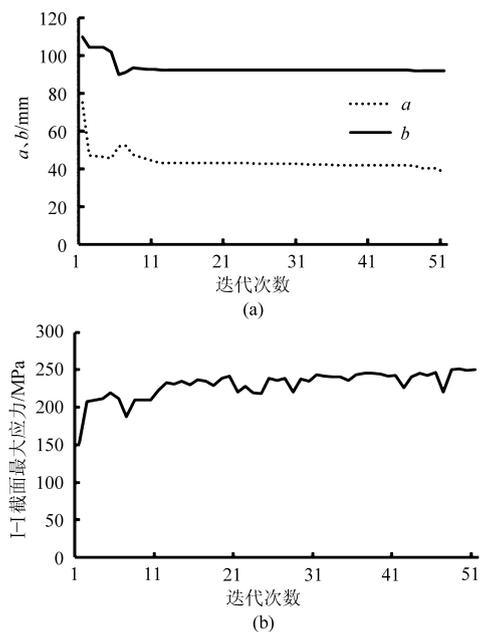


图 12 ANSYS 优化结果

Fig. 12 Optimization results in ANSYS

(a) a 、 b 随迭代次数的变化规律

(b) I-I 截面最大应力随迭代次数的变化规律

通过 ANSYS 优化结果可知,序列 47 为最优设计序列,其中 I-I 截面最大应力为 220.27 MPa, b 为 92.081 mm, a 为 41.501 mm,目标函数 W 为 24.183 kg,比该款转向桥壳质量 30.518 kg 降低了 20.8%,优化效果明显。由图 12 可以看出,各设计变量、状态变量随迭代次数的增加,向最佳设计方案逼近,且逼近效果良好。

根据优化结果对该机型转向桥壳截面尺寸进行调整, b 取 95 mm, a 取 45 mm,厚度仍然为 8 mm。经 ANSYS 强度、刚度分析,3 种工况下应力、变形量分别为: 164.839 MPa、1.189 mm; 208.369 MPa、1.769 mm; 84.189 MPa、0.062 mm,均满足强度、刚度要求。此时转向桥壳质量为 25.087 kg,质量下降了 17.8%。该设计方案不仅节约了材料,而且矩形

截面转向桥壳的加工制造性优于钟形桥壳,从而大大降低生产成本。

4 各工况最大应力出现原因及工艺优化方案

由 ANSYS 分析应力云图可知,最大应力出现在转向桥壳两端焊合处和加强筋焊合处,如图 13 所示。

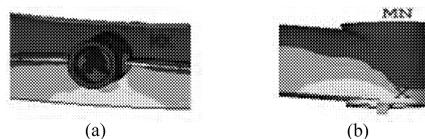


图 13 最大应力集中区

Fig. 13 Von-Mises concentration areas

图 13 中这些位置结构变化比较剧烈,易引起应力集中。为避免应力集中造成转向桥壳疲劳破坏,可对应力集中区采取倒角、圆弧过渡,还可对转向桥壳应力集中区进行热处理、冷作硬化、表面渗碳或增加合金含量等措施,以提高该位置的材料屈服极限强度,从而保证转向桥壳不发生断裂破坏。

5 结论

(1) 研究了轮式联合收获机转向桥壳截面形式对其强度的影响,得到在理想状态下,工字形截面最优,但综合应力、变形量图和加工制造性,优先选用矩形截面,这为转向桥壳截面形式的选择提供了依据。

(2) 结合设计理论及专家经验,提出了转向桥壳优化设计流程。将某款联合收获机转向桥壳中间梁截面改为矩形,并对其截面轮廓尺寸进行了优化设计,使转向桥壳质量下降了 17.8%。

(3) 对应力集中区采取倒角、圆弧过渡,热处理、冷作硬化、表面渗碳或增加合金含量等方法来避免因应力集中造成的转向桥壳疲劳破坏。

参 考 文 献

- 刘洪林. 拖拉机设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- 吴春虎,李方义,李剑峰,等. 基于 FEM 的驱动桥壳轻量化设计[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2011,35(6): 1 248 ~ 1 251.
Wu Chunhu, Li Fangyi, Li Jianfeng, et al. Lightweight design of rear axle housing based on FEM [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2011, 35(6): 1 248 ~ 1 251. (in Chinese)
- 郑松林,卢蕾蕾,冯金芝,等. 轿车后桥结构强度与模态分析[J]. 上海汽车,2011(4): 25 ~ 28.
- 曾金玲,雷雨成,魏德永. 冲焊桥壳的轻量化设计[J]. 机械设计,2007,24(1): 32 ~ 34.
Zeng Jinling, Lei Yucheng, Wei Deyong. Light weighted optimization design of punching-welded bridge housing [J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(1): 32 ~ 34. (in Chinese)
- 左曙光,阎礁,靳晓雄,等. 扭杆梁后桥结构轻量化分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(12): 1 674 ~ 1 678.
Zuo Shuguang, Yan Jiao, Jin Xiaoxiong, et al. Analysis of light-weight structure of twist beam rear axle [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(12): 1 674 ~ 1 678. (in Chinese)

履带式收获机械传动系快速设计推理流程的实现需要多个模块的配合。人机界面提供交互平台,设计知识库存储实例类知识和规则类知识,推理机制是整个系统的核心。

5 结束语

根据履带式收获机械传动系的设计流程建立了履带式收获机械传动系推理流程,分别设计了以实

例相似度匹配算法为核心的 CBR 推理方法,以所构建的履带式收获机械传动系设计知识库为核心的 RBR 推理方法,以及结合 CBR 和 RBR,交替使用的混合推理方法。建立了履带式收获机械传动系快速设计系统推理机制,实际应用表明,应用该推理方法可以缩短设计周期,降低设计成本,较好地实现履带式收获机械传动系的快速设计。

参 考 文 献

- 1 Shen W, Maturana F, Norrie D, et al. Agent-based approaches for advanced CAD/CAM systems [C] // Proceedings of the 5th International Conference on CAD/GraPhics, 1997: 609 ~ 615.
- 2 Pinfold, Martyn, Chapman, et al. The application of KBE techniques to the FE model creation of an automotive body structure [J]. Computers in Industry, 2001, 44(1): 1 ~ 10.
- 3 蒋建东,叶永伟,张宪,等. 基于 CBR 小型农业作业机的可重构设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 32 ~ 35.
Jiang Jiandong, Ye Yongwei, Zhang Xian, et al. Study on small agricultural machinery products reconfigurable design based on CBR [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 32 ~ 35. (in Chinese)
- 4 吴振华,赵韩,陈兴玉,等. 面向传动件设计的实例推理技术研究[J]. 机械设计与制造, 2008(7): 3 ~ 5.
Wu Zhenhua, Zhao Han, Chen Xingyu, et al. Research on case-based reasoning for transmission-part design [J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(7): 3 ~ 5. (in Chinese)
- 5 李长林,王雪亮,金晓萍,等. 高速插秧机底盘快速设计专家系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 323 ~ 328.
Li Changlin, Wang Xueliang, Jin Xiaoping, et al. Construction of high-speed transplanter chassis rapid design expert [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 323 ~ 328. (in Chinese)
- 6 赵玉明,贾现召,李济顺,等. 滚动轴承知识库系统研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(6): 89 ~ 91.
Zhao Yuming, Jia Xianzhao, Li Jishun, et al. Research on the knowledge base system of rolling bearings [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2010, 38(6): 89 ~ 91. (in Chinese)
- 7 李巍,胡伟轩,胡维刚,等. 基于规则与基于实例的集成推理研究[J]. 计算机工程与应用, 1995(1): 46 ~ 48.
Li Wei, Hu Weixuan, Hu Weigang, et al. Integrated reasoning research of rule-based reasoning and case-based reasoning [J]. Computer Engineering and Applications, 1995(1): 46 ~ 48. (in Chinese)
- 8 周英,甘忠,张贤杰. 注塑件相似度计算方法[J]. 航空制造技术, 2008(7): 87 ~ 90.
Zhou Ying, Gan Zhong, Zhang Xianjie. Similarity calculation method of plastic injection part [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(7): 87 ~ 90. (in Chinese)
- 9 Kwong C K, Smith G F, Lau W S. Application of case based reasoning in injection moulding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(3): 463 ~ 467.
- 10 张代胜,王悦,陈朝阳. 融合实例与规则推理的车辆故障诊断专家系统[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 91 ~ 95.
Zhang Daisheng, Wang Yue, Chen Zhaoyang. Vehicle-fault diagnosis expert system of case-based and rule-based reasoning [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 91 ~ 95. (in Chinese)

(上接第 287 页)

- 6 朱茂桃,陈昆山. 农用运输车后桥壳体的结构强度分析[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 21 ~ 23.
Zhu Maotao, Chen Kunshan. Structural analysis of the rear axle housing in a farm transport vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 21 ~ 23. (in Chinese)
- 7 李欣. 重型货车驱动桥壳结构分析及其轻量化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
Li Xin. Structure analysis and lightweight optimization study on heavy truck driving axle housing [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006. (in Chinese)
- 8 Ali Jafari, Majid Khanali, Hossein Mobli, et al. Stress analysis of front axle of JD 955 combine harvester under static loading [J]. Journal of Agriculture & Social Sciences, 2006, 2(3): 133 ~ 135.
- 9 Sanjay Aloni, Sandip Khedkar. Comparative evaluation of tractor trolley axle by using finite element analysis approach [J]. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), 2012, 4(4): 1 351 ~ 1 360.
- 10 王直民,张土乔,吴小刚. 不平整路面上的车辆等效动载系数[J]. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(6): 1 007 ~ 1 011.
Wang Zhimin, Zhang Tuqiao, Wu Xiaogang. Equivalent vehicle dynamic load coefficient on rough pavement [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2007, 41(6): 1 007 ~ 1 011. (in Chinese)