

基于可靠性机械传动铰接车分动箱设计分析

张鉴隆, 叶立清, 黄晓明, 邝 芸
(广东岭南职业技术学院, 广东 广州 510663)

摘 要 分动箱主要承担着按比例将动力分配给各驱动轴的任务, 实现各种工况行驶需求。针对机械传动铰接车设计了一种具有高低档位变换、前后输出端差速及锁止功能的分动箱。该方案以可靠性为主要设计目标, 结合整车性能需求, 通过对分动箱结构解析、行星齿轮传动的参数化和离合器尺寸设计, 以及分动箱系统可靠性建模仿真, 创新设计行星齿轮系与锁止离合器相结合的变速结构, 能够实现分动箱高低档位的切换, 遵循结构同一性原则, 差速锁止功能同样由离合器结构实现。基于 Romax 对传动系统进行仿真, 得到其传动效率、可靠性指标、有效寿命等参数, 得出分动箱整体运行工作特性。在标准规定的载荷谱下得到其齿轮应力状态、接触与弯曲安全系数、轴承有效寿命与损伤比等可靠性指标, 验证系统优化设计的可行性。

关键词 铰接车; 分动箱; 可靠性; 模型; 设计

中图分类号: TH16; TH132.41; U463.21 文献标识码: A 文章编号: 1001-3997(2018)09-0244-03

DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2018.09.065

Optimization Design of Transfer Case in Mechanical-Driving Articulated Dump Truck Based on Reliability

ZHANG Jian-long, YE Li-qing, HUANG Xiao-ming, KUANG Yun

(Guangdong Lingnan Institute of Technology, Guangdong Guangzhou 510663, China)

Abstract The transfer case mainly undertakes the task of distributing torque to different output ends with designated proportion, to achieve a variety of conditions driving demand, which can achieve variety conditions driving demand. To meet the requirements of mechanical-driving articulated dump truck, a transfer case with the function of shifting, differential and differential lock was designed. The transfer case was designed for the target of promoting reliability. Through explanting the traditional transfer case structure, parameterization design of planetary gear transmission, size design and calculation of clutch and reliability modeling simulation design of the overall system. Innovative designing the shift combination structure of planetary gear system and locking clutch, the transfer case have the function of shift, differential and differential locked. Based on Romax modeling software, the transmission system was analyzed, obtaining the parameters such as efficiency, reliability and service life, getting the overall performance of the transmission system. Under the standard load spectrum, the reliability indexes such as gear stress state, contact and bending safety factor, bearing effective life and damage ratio were obtained, and the feasibility of system optimization design was verified.

Key Words Articulated Dump Truck; Transfer Case; Reliability; Model; Design

1 引言

国内现有的铰接车大部分采用采埃孚、艾利逊等国外品牌的变速器或分动箱产品, 其技术成熟且性能可靠的优势不容置疑, 但高昂的成本却直接限制了铰接车在国内市场的普及与应用^[1], 国内相关技术与研究储备不足, 因此, 开发一款可靠性高、性能全面且成本上具备优势的分动箱设计方案不但能够填补国内空白, 积累初期的设计研发技术资料, 而且有利于做大国内铰接车市场, 拥有较强的实用意义与广阔的发展前景。

针对分动箱可靠性设计, 国内外学者取得了一定的成果: 文献^[2]基于传统设计法中的安全系数和结构破坏概率之间的内在关系建立的理想数学模型, 即应力-强度干涉模型, 对分动箱可靠性分析模型初步建立; 文献^[3]通过对分动箱传动系统零部件多种潜在失效模式及其对系统功能的影响, 以及后果的严重程度进行分析; 文献^[4]基于公理化设计, 分析分动箱性能需求与各个设计参数间之间的关系; 文献^[5]对传动系统模块组件进行分解, 功能需求与质量指标进行划分, 分析可靠性与相关参数之间的关系。

来稿日期: 2018-04-07

基金项目: 广东省机械教指委教改项目(JZ201327C)

作者简介: 张鉴隆 (1981-) 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向: 机械设计与制造

针对铰接车运行特点,设计一种具有高低档位变换、前后输出端差速及锁止功能的机械传动铰接式自卸车的分动箱。以可靠性为主要设计目标,结合整车性能需求,通过对分动箱结构解析、行星齿轮传动的参数化和离合器尺寸设计,以及分动箱系统可靠性建模仿真,创新设计行星齿轮系与锁止离合器相结合的变速结构,实现分动箱高低档位的切换,遵循结构同一性原则,差速锁止功能同样由离合器结构实现。采用 Romax 对传动系统进行可靠性寿命分析,以验证整体方案的运行工作特性。

2 分动箱传动方案及设计

2.1 分动箱传动方案

所研究分动箱优化设计前后结构原理,如图 1 所示。原设计能够实现输入转矩的增大与分配、前后输出端差速等功能,能够满足基本的运行需求,但简单的结构也决定其不能实现更多实际中迫切需要的性能^[6],如图 1(a)所示。优化后分动箱传动原理图,如图 1(b)所示。

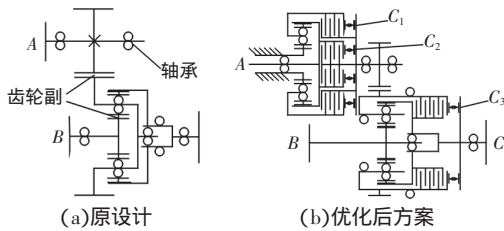


Fig.1 Schematic Diagram of the Transmission Box Transmission System

2.2 分动箱传动比确定

整车性能曲线使用 Matlab 软件绘制,发动机转矩函数可通过对数据特征点进行五次拟合得到。参照市场中同级铰接车产品的动力性与经济性^[7],按比例计算可得分动箱低档位与高档位传动比之比数值约为 1.4 左右,分别试取传动比为 1.2、1.3、1.4、1.5、1.6 五组数值绘制整车牵引力特性曲线,选择最佳低速档取值或其范围。分动箱低速档位不同传动比设置下的整车牵引力特性曲线如图 2(a)、图 2(d)所示。其中两条蓝色竖线为对应整车空载与满载质量的牵引力标定线,红色横线为对应整车爬坡度的阻力标定线,蓝色斜线为不同爬坡度下的阻力基准线,配合蓝色竖线查阅。可以看出传动比选择越小整车爬坡能力越弱且最高车速越高,传动比选择越大整车爬坡能力越强且最高车速越低。

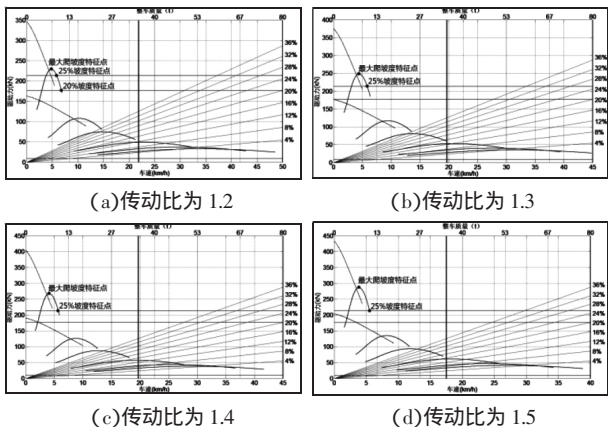


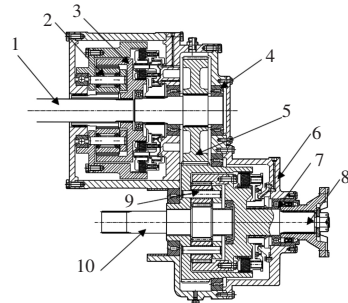
图 2 分动箱低速档位不同传动比设置整车牵引力特性曲线

Fig.2 Different Transmission Ratio Set Vehicle Traction Characteristics Curve

对比牵引力特性曲线,主要参考点为 25%坡度爬坡速度、最大爬坡度估计值以及后备功率估计值。要求整车最高车速至少能达到 38km/h 性能要求^[8]。如图可知(1.3~1.5)传动比范围的曲线较为符合整车性能要求,同时通过 Matlab 进一步计算可以得到符合要求的分动箱低档位传动比选择范围约为(1.33~1.47),因此下一步设计应为选择合理的传动布置方案以将分动箱低档位传动比控制在此范围内。

2.3 分动箱关键系统部件设计

在新方案原理图基础上设计分动箱总体装配图,如图 3 所示。



1.输入轴 2.减速器行星齿轮系 3.中间轴承 4.中间轴承 2
5.一级减速齿轮系 6.大支撑轴承 7.输出轴承 8.后输出轴
9.差速行星齿轮系 10.前输出轴
图 3 分动箱新方案传动装配

Fig.3 Schematic Diagram of the New Assembly Drive Assembly

2.3.1 行星齿轮系

分动箱变速行星齿轮系各齿轮设计参数列表,如表 1 所示。依据表中数据对各齿轮进行接触与弯曲强度校核。

表 1 分动箱变速行星齿轮系齿轮参数
Tab.1 Gearbox Gears for Variable Speed Planetary Gears

	太阳轮 S_1	行星齿轮 P_1	齿圈 R_1
模数 m	3	3	3
分度圆直径 d/mm	111	84	279
压力角 α	20°	20°	20°
齿数 z	37	28	93
齿宽 b/mm	70	76	70
工作齿宽 B/mm	70	70	70
齿顶高系数	1	1	1
顶隙系数	0.25	0.25	0.25
齿顶高 h_a/mm	3	3	3
齿根高 h_f/mm	3.75	3.75	3.75
齿高 h_r/mm	6.75	6.75	6.75
齿轮中心距 a/mm	97.5	—	97.5
传动比	1.398	1.398	1.398
基圆直径 d_b/mm	104.31	78.93	262.17
节圆直径 d'/mm	111	84	279
齿顶圆直径 d_a/mm	117	90	273
齿根圆直径 d_f/mm	103.5	76.5	286.5
重合度	1.668	—	1.909
单个齿距偏差 μm	10	9	11

2.3.2 离合器

分动箱设计的离合器结构选用摩擦盘式离合器,静摩擦力矩 T_c 为 $T_c = fFZR_c$ (1)

摩擦盘构造一般为环形,对摩擦面作用半径进行微积分计算可得摩擦片的平均摩擦半径为 $R_c = \frac{2}{3} \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}$ (2)

当摩擦盘内径与外径比值 $d/D \geq 0.6$ 时,摩擦片摩擦半径为:

$$R_c = \frac{R+r}{2} \quad (3)$$

而摩擦面承受的单位压力为:

$$p_0 = \frac{4F}{\pi(D^2 - d^2)} = \frac{F}{\pi(R^2 - r^2)} \quad (4)$$

将式(4)与式(3)代入式(2)得:

$$T_c = \frac{\pi}{12} f Z p_0 D^3 (1 - c^3) \quad (5)$$

式中 c —摩擦片内、外径之比 $= d/D$ 。

设计时 T_c 应大于输入端的最大转矩,即:

$$T_c = \beta T_{\text{输入}} \quad (6)$$

离合器结构形式和摩擦片材料确定^[10], 输入转矩 $T_{\text{输入}}$ 已知的前提下, 结合式(5)和式(6), 适当选取后备系数 β 和单位压力 p_0 , 可计算摩擦片外径估算值:

$$D = \sqrt[3]{\frac{12\beta T_{\text{输入}}}{\pi f Z p_0 (1 - c^3)}} \quad (7)$$

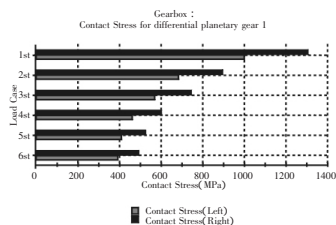
本分动箱离合器采用湿式摩擦盘式离合器, 此结构离合器具有摩擦因数小、摩擦片数多、单位压力大、散热性能好的特点, 具有较为稳定的工作性能与可靠性。

3 分动箱建模分析

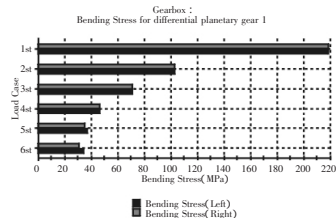
使用 Romax 对分动箱传动系统进行建模能够完成对整体传动系的动力系统仿真。

3.1 分动箱齿轮可靠性设计

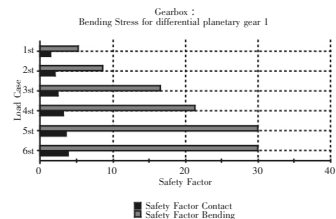
首先研究差速行星齿轮系的行星齿轮受力情况, 差速行星齿轮的各档位接触应力、弯曲应力及相应的安全系数, 如图 4(a)~图 4(c)所示。在变速箱第 1 档位分动箱受力最大。



(a)各档位接触应力



(b)各档位弯曲应力

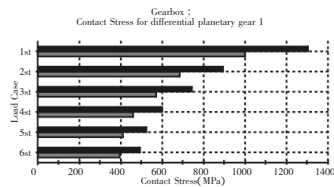


(c)各档位接触与弯曲安全系数

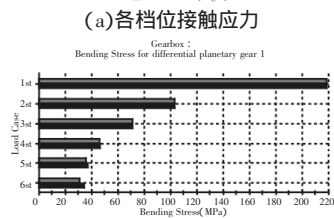
图 4 分动箱传动系差速行星齿轮全寿命仿真

Fig.4 Life Cycle Simulation of Differential Planetary Gears

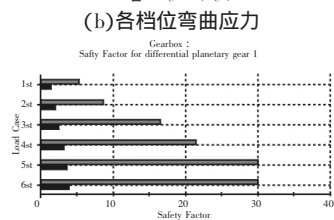
变速行星齿轮系的行星齿轮受力情况, 如图 5(a)~图 5(c)所示。变速行星齿轮的各档位接触应力、弯曲应力及相应的安全系数, 在变速箱第 1 档位时, 行星齿轮承受最大载荷, 但其受力状态好于差速行星齿轮, 由于其受力状态同差速行星齿轮类似, 总体看来变速行星齿轮受力状态优于差速行星齿轮。



(a)各档位接触应力



(b)各档位弯曲应力



(c)各档位接触与弯曲安全系数

图 5 分动箱传动系变速行星齿轮全寿命仿真

Fig.5 Full Life Simulation of Variable Speed Planetary Gears

3.2 分动箱轴承可靠性设计

对分动箱传动系统 Romax 模型进行全寿命仿真, 变速行星齿轮轴承各档位损伤比, 如图 6 所示。

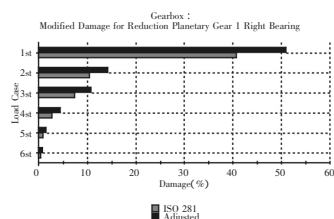


图 6 变速行星齿轮轴承各档位损伤比

Fig.6 Shift Gear Bearing the Gear Damage Ratio

由数据可以看出第 1 档位对轴承造成的损伤贡献了整个损伤比的 60%, 因此可知变速行星齿轮轴承的损伤主要由于低档位大扭矩。

4 结论

机械传动铰接车因其运行环境恶劣、工况复杂多变的特点, 传动系统设计需考虑载荷重、冲击大等特性, 因此对分动箱传动系统的可靠性设计意义重大。结合铰接车实际运行工况, 确定载荷分布规律, 针对整车性能需求对分动箱改进前方案进行合理改进, 完成分动箱新方案的整体可靠性设计。结果可知: (1) 创新使用传统的安全系数法与可靠性评价指标结合的设计方法对分动箱变速与差速行星齿轮系、离合器等关键零部件进行可靠性设计, 在保证系统可靠运行的前提下, 尽量减小分动箱整体尺寸、转动惯量等参数, 提高其经济性指标; (2) 对分动箱传动系统进行 Romax 虚拟样机模型的建立, 通过工况运行验证了模型的正确性, 并对齿轮与轴承进行仿真分析, 验证了齿轮参数与轴承型号的选择满足设计要求。

(下转第 250 页)

的空化作用下进一步提高。根据图6所示。在表面粗糙度方面,超声产生的涡流和泵吸效应改善了加工间隙导电粉末的分布,减少了加工过程中TC4钛合金加工屑的粘连,进而让放电位置更加随机,放电状态也得到提升,工件表面质量也有一定改善,表面粗糙度减少了15%左右。

4 结论

(1)借助ANSYS对矩形六面体振动平台进行仿真分析,进而确定振动平台的具体尺寸,可较好实现超声在工件上的振动。利用FLUENT标准 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型对搅拌叶进行了仿真优化,确定离底高度为135mm的六叶直叶式涡轮搅拌器对混粉电火花中的工作液搅拌效果最好。

(2)设计四水平四因素正交试验表,通过极差分析分别确定了两种加工方式的最优参数组。对于加工速度,最优参数为:间隙电压70V,峰值电流15A,脉冲间隔150 μ m,脉冲宽度60 μ m;对于表面粗糙度,最优参数为:间隙电压60V,峰值电流2A,脉冲间隔30 μ m,脉冲宽度120 μ m;

(3)在混粉电火花加工中,将频率为20KHz的超声振动通过振动平台传递在工件上,实现工件附加超声的混粉电火花加工。通过对比试验,可知在混粉电火花加工TC4钛合金的过程中,对工件附加超声,对加工时间和表面粗糙度有明显效果。分析对比试验的数据,加工时间较普通混粉电火花加工节约了10%左右,表面粗糙度减少了15%左右。

参考文献

- [1] Hatt O, Crawford P, Jackson M. On the mechanism of tool crater wear during titanium alloy machining[J]. Wear, 2017(374-375): 15-20.
- [2] Verma V, Sajeevan R. Multi process parameter optimization of diesinking EDM on titanium alloy(Ti6Al4V) using taguchi approach[J]. Materials Today Proceedings, 2015, 2(4-5): 2581-2587.
- [3] 赵福令, 吕战竹, 张宝荣. 混粉电火花加工工艺特性的研究[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(6): 573-576.
- (Zhao Fu-ling, Lv Zhan-zhu, Zhang Bao-rong. Study on technological characteristics of mixed powder EDM[J]. Science and Technology, 2003, 3(6): 573-576.)
- [4] 车江涛, 祝锡晶, 王建青. TC4电火花加工的工艺参数优化设计[J]. 机床与液压, 2014(11): 16-18.
- (Che Jiang-tao, Zhu Xi-jing, Wang Jian-qing. Optimization design of TC4 EDM parameters[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014(11): 16-18.)
- [5] 张云鹏, 孙广标, 张安洲. 超声磨料对TC4钛合金电火花加工表面质量的影响[J]. 航空学报, 2010(1): 204-209.
- (Zhang Yun-peng, Sun Guang-biao, Zhang An-zhou. Effect of ultrasonic abrasive on the surface quality of TC4 titanium alloy by EDM[J]. Journal of Aeronautics, 2010(1): 204-209.)
- [6] Kremer D, Lhiaubet C, Moisan A. A study of the effect of synchronizing ultrasonic vibrations with pulses in EDM[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1991, 40(1): 211-214.
- [7] 迟恩田, 任中根, 张云鹏. 超声磨料混粉电火花复合加工的研究[J]. 电加工与模具, 2003(3): 29-32.
- (Chi En-tian, Ren Zhong-gen, Zhang Yun-peng. Study on composite machining of ultrasonic abrasive mixed powder EDM[J]. Electrical Processing and Molds, 2003(3): 29-32.)
- [8] 王璟, 祝锡晶, 孔文军. 7075铝合金工件水平超声振动电火花复合加工试验研究[J]. 机械设计与制造, 2017(3): 115-118.
- (Wang Jing, Zhu Xi-jing, Kong Wen-jun. Experimental research on horizontal ultrasonic vibro-EDM machining of 7075 aluminum alloy work-piece[J]. Journal of Machinery Design and Manufacturing, 2017(3): 115-118.)
- [9] 韩光超, 吴文, 徐林红. 工件超声振动辅助微通道铣削成形试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2016(9): 119-124.
- (Han Guang-chao, Wu Wen, Xu Lin-hong. Experimental research on the micromachining of micro-channel with ultrasonic vibrations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016(9): 119-124.)
- [10] 王目喜. 钛合金混粉电火花加工试验研究和工作液搅拌装置设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- (Wang Mu-xi. Titanium alloy powder mixed electrical discharge machining test and design of the working fluid mixing device[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)

(上接第246页)

参考文献

- [1] 陈连, 邹广萍. 机械可靠性设计的最优化方法及其应用研究[J]. 机械设计与制造, 2006(2): 8-10.
- (Chen Lian, Zou Guang-ping. The optimal method of machine reliability design and its application[J]. Machinery Design & Manufacture, 2006(2): 8-10.)
- [2] Sun B, Zhang X, Zhou C. Dynamics modeling and optimization of rubber suspension of articulated dump truck[C].// International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics, 2007.
- [3] Zhang Y, Shen Y, H Zhang W. Multi-objective optimization analysis of motor cooling system in articulated dump truck[J]. Advanced Materials Research, 2012(383-390): 4715-4720.
- [4] Zhao Z, Wang J. Fuzzy optimal design of articulated dump truck's steering mechanism[C].// International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks, IEEE, 2011: 4093-4096.
- [5] Zhao X, Yang J, Zhang W. Feedback linearization control for path tracking of articulated dump truck[J]. Telkomnika, 2015, 13(3): 922.
- [6] 曹晓龙. 290马力轨道车机械换向分动箱设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2008.
- (Cao Xiao-long. The design of the 290-horsepower railway vehicle mechanical commutator box[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008.)
- [7] Panzani G, Corno M, Tanelli M. Designing on-demand four-wheel-drive vehicles via active control of the central transfer case[J]. Intelligent Transportation Systems IEEE Transactions on, 2010, 11(4): 931-941.
- [8] 尚振国, 王华. 基于齿轮箱整体模型的齿轮有限元接触分析[J]. 机械传动, 2012, 36(5).
- (Shang Zhen-guo, Wang Hua. Finite element contact analysis of gear based on whole gearbox model[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(5).)
- [9] 白恩军, 谢里阳, 佟安时. 考虑齿轮轴变形的斜齿轮接触分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1975-1981.
- (Bai En-jun, Xie Li-yang, Tong An-shi. The contact analysis of helical gear in considering gear shaft deformation[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(10): 1975-1981.)
- [10] 王善坡, 李舜韶, 廖庆斌. 专用汽车分动箱模态试验与分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 24-27.
- (Wang Shan-po, Li Shun-ming, Liao Qing-bin. Modal experiment and analysis of certain special vehicle transfer case[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 24-27.)