

装载机发动机与液力变矩器功率匹配优化^{*}

常 绿

(淮阴工学院交通工程学院, 淮安 223003)

【摘要】 分析了现有装载机发动机与液力变矩器功率匹配的特性。根据装载机液压泵的工作情况,把装载机分为3种典型工况,建立了装载机发动机与液力变矩器匹配多目标优化模型。建立了基于满意度原理的满意度函数,给出了解题步骤和方法。算例分析表明:基于满意度原理的装载机发动机与液力变矩器功率匹配方法优化可行。

关键词: 装载机 液力传动 功率匹配 优化 满意度函数

中图分类号: TD422.3; U463.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)07-0025-05

Optimization of Power Matching on Torque-converter with Diesel Engine for Wheel Loader

Chang Lü

(Faculty of Transportation Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China)

Abstract

The no-rationality of the optimization of power matching on torque-converter with diesel engine for wheel loader was analyzed. Based on the hydraulic pump in accordance with the work of loaders, the loader was divided into three typical operating conditions. The satisfactory degree function in the optimization of power matching on torque-converter with diesel engine based on the generalized satisfactory degree theory was explored. Multi-objective optimization design of power matching on torque-converter with diesel engine was introduced, and the problem-solving steps and methods were given. The analysis shows that this method can improve the quality of the power matching.

Key words Loader, Hydrodynamic transmission, Power matching, Optimization, Desirability function

引言

装载机常以柴油发动机为动力源,但柴油发动机的转矩适应系数小,难以适应装载机外载荷频繁变化的要求^[1]。如果配置功率较大的发动机,则装载机长时间在负荷不足的工况下工作,降低了发动机的功率利用率。当采用液力变矩器后,发动机与液力变矩器组合构成一种复合动力装置,能使装载机获得较好的牵引特性,同时对外载荷的变化有较强的自动适应性,能减少振动和冲击,避免发动机熄火,实现无级变速,减少换挡次数,提高发动机功率

利用率^[2-3]。

装载机发动机与液力变矩器的匹配方法与装载机的实际工作情况还有较大差距。本文根据液压泵的工作情况,把装载机分为3种典型工况^[4-5],针对目前发动机与液力变矩器匹配过程中存在的不足,基于满意度原理构建目标函数,并给出求解过程。

1 发动机与液力变矩器匹配存在的问题

目前发动机与液力变矩器有3种匹配方式^[6-9]:全功率匹配、部分功率匹配和折衷匹配。以ZL30型装载机为例,3种匹配方式如图1所示,图

中, M_e 为发动机外特性转矩曲线。 M_3 为发动机功率减去变速泵满载、转向泵和工作泵空载功率后, 发动机传给液力变矩器的转矩特性曲线, A 为发动机全功率匹配额定工作点, 这种匹配方式称为全功率匹配。 M_4 为发动机功率扣除 20% ~ 40% 后, 再传给液力变矩器的转矩特性曲线, B 为发动机折衷匹配额定工作点, 这种匹配方式称为折衷匹配。 M_6 为发动机功率减去变速泵和工作泵满载, 转向泵空载的功率后, 发动机传给液力变矩器的转矩特性曲线, C 为发动机部分功率匹配额定工作点, 这种匹配方式称为部分功率匹配。 M_5 为发动机功率减去变速泵和工作泵满载、转向泵空载功率和的一半后, 发动机传给液力变矩器的转矩特性曲线。

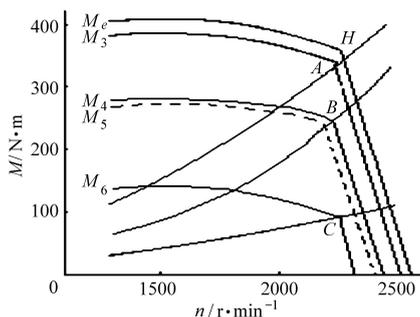


图1 发动机与液力变矩器匹配

Fig. 1 Matching relationship between engine and torque converter

全功率匹配方案和部分功率匹配方案与装载机实际工作情况有较大差距, 在工程实践中较少采用。折衷匹配是扣除 20% ~ 40% 的功率后再匹配, 但到底扣除多少则无定论, 对一台具体型号的装载机, 这种模糊的匹配原则显得不够准确。

装载机发动机与液力变矩器的优化匹配问题本质上是一个多目标优化问题。基于满意度原理的多目标满意优化, 在求解过程中追求满意解而不是最优解, 这使得多目标优化成为可能。

2 匹配要求及数学模型

变速泵用作液力变矩器油的循环冷却、变速箱的动力换挡及润滑, 该泵始终与液力变矩器共同工作。装载机在不同的工作状态, 转向泵和工作泵的工作情况差别很大。根据液压泵的工作情况, 把装载机分 3 种典型工况^[10]。①直线行驶工况: 当装载机直线行驶时, 变速泵在工作, 转向泵和工作泵在空载状态。②铲掘联合正常工况: 装载机进行铲掘作业, 变速泵和工作泵都处在工作状态, 转向泵在空载状态。③铲掘联合极限工况: 一定时间内, 工作泵工作在额定转矩, 这一工况定义为铲掘联合极限工况。

工作泵额定转矩远大于转向泵额定转矩, 文

献[11]对工作泵输入转矩进行了实验测试, 图 2^[11]为实验得到的装载机在原生土作业中工作泵输入转矩-时间历程。装载机在一个工作循环中, 重复进行铲掘—重载倒车—重载前进—卸料—空载倒车—空载前进等作业程序, 图中的纵坐标为 200 s 时长, 测得的输入转矩电压信号。

从图 2 示出的实验结果可知, 工作泵在额定转矩持续工作时间很短, 仅仅以尖峰载荷的形式出现。文献[11]对图 2 中工作泵输入转矩作了概率分布密度分析, 结果表明, 在铲掘过程中, 工作泵的转矩从空载转矩到额定转矩之间不断变化, 其均值大约在额定转矩的一半。本文取均值为额定转矩的一半, 定义此工况为铲掘联合正常工况。

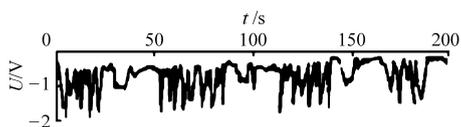


图2 原生土作业时工作泵输入转矩时间历程

Fig. 2 Input torque of pump during loader shoveling original soil

图 3 示出液力变矩器原始特性曲线。

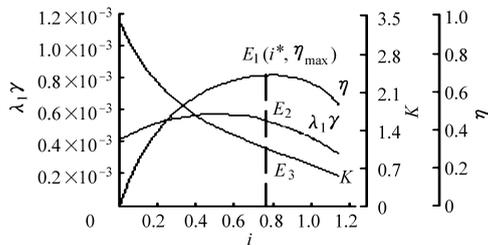


图3 液力变矩器原始特性拟合曲线

Fig. 3 Characteristic curves of the torque-converter

2.1 设计变量

设计变量为液力变矩器的有效循环圆直径 D , 即: $\mathbf{X} = [x] = [D]$ 。

2.2 约束条件

按直线行驶工况匹配时, 希望液力变矩器工作在最高效率点, 图 1 中 A 为匹配点, 又因

$$M_A = \lambda_1^* \gamma D^5 n_1^2 \quad (1)$$

其中

$$\gamma = \rho g$$

式中 λ_1^* ——液力变矩器最高效率时泵轮转矩系数

γ ——工作液体单位体积的重量

ρ ——密度

则可求得按直线行驶工况匹配的液力变矩器循环圆直径, 记为 D_1 , 显然, 当装载机直线运输行驶时, 这一匹配方式能保证发动机和液力变矩器有最大输出功率。

按铲掘联合极限工况匹配时, 希望液力变矩器工作在最高效率点, 图 1 中 C 为匹配点, 又因

$$M_c = \lambda_1^* \gamma D^5 n_1^2 \quad (2)$$

则可求得按铲掘联合极限工况匹配的液力变矩器循环圆直径,记为 D_2 ,显然,当装载机在铲掘联合极限工况时,这一匹配方式能保证发动机和液力变矩器有最大输出功率。

按直线行驶工况匹配求得的 D_1 、按铲掘联合极限工况求得的 D_2 构成边界约束条件,即 $D_2 \leq D \leq D_1$ 。

2.3 目标函数

装载机发动机与液力变矩器的优化匹配是一个多目标优化问题。根据装载机几种典型工况特点,提出以下2个目标函数。

(1)按铲掘联合正常工况匹配,希望液力变矩器工作在最高效率点,发动机功率减去变速泵和工作泵满载、转向泵空载功率和的一半后,得到 M_5 曲线,又因 $M_d = \lambda_1^* \gamma D^5 n_1^2$,不同的 D ,对应不同的 M_d 曲线方程,联立 M_5 和 M_d 曲线方程,可求得

$$n_1^* = \left(\frac{M_d}{\gamma \lambda_1^* D^5} \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中 n_1^* ——液力变矩器最高效率时的负荷抛物线与 M_5 交点的转速

为了提高装载机燃油经济性,提高发动机功率利用程度,以确保液力变矩器泵轮转速不过低为目标,即装载机在铲掘联合工况时,有^[10]

$$n_1^* / n_{eH} \geq 0.85 \quad (4)$$

式中 n_{eH} ——发动机额定转速

不同的 D 对应不同的 n_1^* , n_1^* 越接近 n_{eH} ,则对匹配结果越满意。

(2)在装载机铲掘联合极限工况时,应确保发动机不熄火为目标,即装载机在铲掘联合极限工况时,应保证最高一条负荷抛物线与图1中 M_6 的交点在发动机最大转矩的右边^[10]。联立 $M_c = \lambda_{1\max}^* \gamma D^5 n_1^2$ 和 M_6 曲线求得交点 n_{1c} ,发动机最大转矩对应的转速为 n_{eM} ,有

$$n_{1c} / n_{eM} \geq 1 \quad (5)$$

式中 n_{1c} ——液力变矩器最高一条负荷抛物线与 M_1 交点的转速

n_{eM} ——发动机最大转矩所对应的转速

液力变矩器在3种典型工况时,其平均输出功率都能达到最大是优化匹配的目标。由于各目标解之间的矛盾性,实际上不存在最优解,为此,提出基于满意度原理的多目标优化方法^[12-15]。

3 满意度函数的构建方法

基于满意度原理的多目标优化设计方法通过将

原问题转化为求解最大满意度函数的新问题,对目标函数的性质进行分析,把式(4)和式(5)建立为基于目标函数的独立满意度函数,即

$$s_1 = \begin{cases} 0 & (n_1^* / n_{eH} < 0.85) \\ n_1^* / n_{eH} & (n_1^* / n_{eH} \geq 0.85) \end{cases} \quad (6)$$

$$s_2 = \frac{n_{1c} - n_{eM}}{n_{eH} - n_{eM}} \quad (7)$$

考虑到装载机绝大部分时间在进行铲掘联合作业,因此把优化目标重点放在铲掘联合作业工况,即 s_1 占的比重大些。采用线性加权组合满意度方法,权重分配为^[9]

$$s = 0.8s_1 + 0.2s_2 \quad (8)$$

式(8)即为目标满意度函数。

4 求解过程

以ZL30型装载机为例,解题步骤为:①由图1中A点的转矩值根据式(1)求得 D_1 。②由图1中C点的转矩值根据式(2)求得 D_2 。③发动机功率减去变速泵、工作泵满载以及转向泵空载功率和的一半后,得到发动机传给液力变矩器的转矩特性曲线 M_1 。④以一定的步长(本文取为0.02)在 D_1 和 D_2 之间搜索 D ,对每一个 D ,根据 $n_1^* = \left(\frac{M_d}{\gamma \lambda_1^* D^5} \right)^{0.5}$ 求出 n_1^* 。⑤根据第4步求得的 D 计算 $M_c = \lambda_1^* \gamma D^5 n_1^2$,联立 M_c 和 M_4 曲线求得交点 n_{1c} ,并得发动机最大转矩对应的转速为 n_{eM} 。⑥根据式(6)~(8)求出满意度 s 。⑦重复以上步骤,以0.02为步长,从 D_1 搜索到 D_2 ,寻找最大的 s ,对应的 D 即为满意度最大的解。

液力变矩器是系列化的产品,优化出的有效直径还需要满足系列化的要求。可以把优化出来的直径与系列化直径比较,选择最接近的直径作为优化结果。

按以上步骤,求得的满意解为: $D = 0.320 \text{ m}$, $s = 0.754$ 。

5 结果分析

ZL30型装载机液力变矩器循环圆直径为 $D = 0.336 \text{ m}$,图4a示出了原匹配方案发动机与液力变矩器共同工作的输出特性曲线。

为了比较优化效果,图4b对应示出了优化后($D = 0.320 \text{ m}$)的发动机与液力变矩器共同工作的输出特性曲线。

图中 n_2 为涡轮转速, P_2 为涡轮轴输出功率, M_2 为涡轮轴输出扭矩。把原匹配方案和优化匹配方案

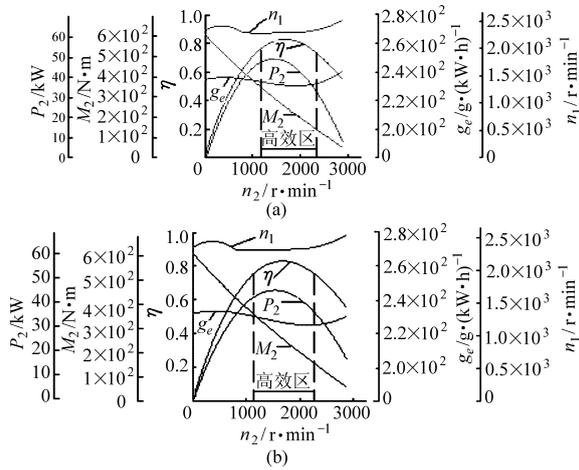


图4 发动机与液力变矩器共同工作的输出特性

Fig.4 Output character of engine and torque converter working together
(a) 优化前 (b) 优化后

的仿真结果列于表1中算例1。表中 D 指液力变矩器有效直径; P'_2 指高效区涡轮平均输出功率; g'_e 指液力变矩器工作在高效区发动机的平均耗油率。

按文献[16]给出的发动机速度特性和液力变矩器原始特性数据,按照本文介绍的基于满意度原理的发动机与液力变矩器优化匹配方法,对液力变

矩器有效直径进行优化计算,限于篇幅,计算过程不再列出,计算结果如表1算例2所示。

表1 两种匹配方案的比较

Tab.1 Performance contrast by two ways of power matching

算例	方案	直径 D/m	输出功率 P'_2/kW	耗油率 $g'_e/g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	满意度
算例1	原方案	0.336	42.67	227.82	0.754
	优化方案	0.320	43.84	226.74	
算例2	原方案	0.367	59.97	278.77	0.734
	优化方案	0.354	61.14	278.14	

通过以上计算和分析可知,优化匹配方案比部分功率匹配方案和全功率匹配方案在动力性和燃油经济性及满足实际工作要求方面有很大优势。

6 结束语

建立装载机发动机与液力变矩器多目标优化模型,构建了基于满意度原理的满意度函数。以ZL30型装载机为例,对发动机与液力变矩器进行了优化匹配,得到了装载机发动机与液力变矩器优化匹配的一个满意解。

参 考 文 献

- 1 蔡敬. 分析发动机与液力变矩器的合理匹配[J]. 工程机械,2003,34(4):28~30.
- 2 刘仕平,贺倩茹. ZL30装载机功率匹配的优化[J]. 水利电力机械,1994,16(8):13~17.
- 3 邓斌. 液力叉车发动机与液力变矩器的匹配及传动系统参数的优化[J]. 机械科学与技术,1997,16(3):419~425.
Deng Bin. Optimization of both matching and parameters of transmission system for hydraulic excavator forklift [J]. Mechanical Science and Technology, 1997,16(3): 419~425. (in Chinese)
- 4 王国彪. 发动机与液力变矩器共同工作点的优化算法[J]. 工程机械,1998,29(3):29~31.
- 5 申天学,王中琪. ZL50装载机液力变矩器与柴油机的匹配分析[J]. 矿山机械,1995(10):21~23.
Shen Tianxue, Wang Zhongqi. Analysis of matching of hydraulic torque convertor with diesel engine of ZL50 loader [J]. Mining & Processing Equipment, 1995(10):21~23. (in Chinese)
- 6 常绿. 基于实时工况的装载机智能换挡规律[J]. 农业工程学报,2009,25(3):69~73.
Chang Lü. Intelligent shift schedule based on working conditions of loader [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(3): 69~73. (in Chinese)
- 7 王学峰. 工程机械液力机械传动变速系统智能控制研究[D]. 长春:吉林大学,2002.
Wang Xuefeng. Study of construction machinery hydraulic mechanical transmission speed of the intelligent control system [D]. Changchun: Jilin University, 2002. (in Chinese)
- 8 常绿,王国强,张英爽. 基于ADVISOR软件的液力变矩器仿真模块的开发[J]. 系统仿真学报,2006,18(12):3396~3398.
Chang Lü, Wang Guoqiang, Zhang Yingshuang. Development of simulation module for performance of torque-converter based on ADVISOR software [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2006,18(12):3396~3398. (in Chinese)
- 9 常绿,王国强,唐新星,等. 装载机发动机与液力变矩器功率匹配优化[J]. 农业机械学报,2006,37(11):28~31.
Chang Lü, Wang Guoqiang, Tang Xinxing, et al. Optimization of power matching on torque-converter with diesel engine for wheel loader [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(11):28~31. (in Chinese)
- 10 夏经纶,薄惠根. 中小型轮式装载机液力变矩器和发动机的匹配[J]. 林业机械,1988(6):26~29.
- 11 宋玉中,诸文农,许纯新. 轮式装载机动态性能实验研究[J]. 工程机械,1987,18(1):21~25.
- 12 罗刚. 满意解原则及其在控制系统中应用的研究[D]. 成都:西南交通大学,1999.

- Luo Gang. Satisfactory solution principles and their application in control system research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999. (in Chinese)
- 13 Yao X S, Huang H Z, Zhou Z R. Study on multi-objective optimization based on generalized satisfactory degree theory for transportation capability of railway network [C] // Traffic and Transportation Studies: Proceedings of ICTTS 2002, 2002: 947 ~ 952.
- 14 黄洪钟,姚新胜,周仲荣. 基于满意度原理的装载机工作装置的多目标优化设计[J]. 机械工程学报,2003,39(5): 97 ~ 103.
Huang Hongzhong, Yao Xinsheng, Zhou Zhongrong. Multi-objective optimization design of the working unit of loader based on the satisfactory degree theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5):97 ~ 103. (in Chinese)
- 15 姚新胜,黄洪钟,周仲荣. 机械满意优化中满意度函数的建立方法[J]. 机械科学与技术,2004,23(4): 399 ~ 401.
Yao Xinsheng, Huang Hongzhong, Zhou Zhongrong. Design of satisfactory-degree function in the mechanical satisfactory optimization[J]. Mechanical Science and Technology, 2004,23(4): 399 ~ 401. (in Chinese)
- 16 孙跃东,周萍,尹冰声. 工程车辆液力变矩器与发动机匹配的研究[J]. 上海理工大学学报,2003,25(3):289 ~ 292.
Sun Yuedong, Zhou Ping, Yin Bingsheng. Study on the matching of torque converter and engine for engineering vehicles [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(3):289 ~ 292. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 24 页)

- 2 陈东升,项昌乐,陈欣. 军用车辆传动系零件载荷谱的建立[J]. 机械强度,2002,24(2): 310 ~ 314.  
Chen Dongsheng, Xiang Changle, Chen Xin. Establishment of the spectrum of the military vehicle transmission elements[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(2): 310 ~ 314. (in Chinese)
- 3 凌静,高镇同. 多工况机械结构疲劳载荷的统计处理[J]. 机械强度,1992,14(2): 31 ~ 34.  
Ling Jing, Gao Zhen tong. Statistical treatment for fatigue loads of a mechanical structure under multi-operating conditions[J]. Journal of Mechanical Strength, 1992, 14(2):31 ~ 34. (in Chinese)
- 4 项昌乐. 车辆传动系轴类零件疲劳设计与变矩器动态特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2001.  
Xiang Changle. The study on fatigue design of the axles and the dynamic characteristics of the torque converter in the vehicle transmission system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001. (in Chinese)
- 5 肖生发,左惟炜,沈德平. 轻型车后桥二维载荷谱及其疲劳寿命预测[J]. 汽车工程,2002,24(4):343 ~ 347.  
Xiao Shengfa, Zuo Weiwei, Shen Deping. Two-dimension load spectrum and fatigue life prediction for the rear axle of light-truck[J]. Automotive Engineering, 2002,24(4):343 ~ 347. (in Chinese)
- 6 周永宏,郑大伟. 相关系数检验表的新算法[J]. 中国科学院上海天文台年刊,1997(18): 17 ~ 22.  
Zhou Yonghong, Zheng Dawei. A new calculation method of correlation coefficient test table [J]. Annals Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 1997(18): 17 ~ 22. (in Chinese)
- 7 阎楚良,王公权. 雨流计数法及其统计处理程序研究[J]. 农业机械学报,1982,12(4): 88 ~ 101.  
Yan Chuliang, Wang Gongquan. Investigation of rain-flow counting method and it's program of statistical treatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 12(4): 88 ~ 101. (in Chinese)
- 8 胡宗武,董邦宣. “雨流法”与疲劳寿命估算[J]. 机械强度,1985,7(4): 53 ~ 60.  
Hu Zongwu, Dong Bangxuan. Rain-flow method and fatigue life prediction[J]. Journal of Mechanical Strength, 1985,7(4): 53 ~ 60. (in Chinese)