

# 多机重联牵引液固耦合负载的平稳性控制策略

黄利辉, 江 帆, 王 佳

(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 针对 HXD1C 型电力机车在吐库二线上双机有线重联牵引油罐车编组存在的纵向冲动问题, 通过对机车牵引 / 制动控制特性研究及现场试验, 提出了一种机车准恒速控制优化策略, 涉及牵引力卸载点、卸载斜率及速度变化频率等, 从而降低牵引力波动的幅值和频率, 最终减少油罐车编组时由于车辆车钩与缓冲器的间隙、车钩状态频繁改变等造成的纵向冲动, 使列车保持平稳运行。其可为类似的准恒速控制机车在多机重联牵引多质点液固耦合负载的平稳性控制提供参考。

**关键词:** 多机重联; 准恒速控制; 液固耦合负载; 纵向冲动; 平稳性控制

中图分类号: U264.91<sup>+</sup>8

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)02-0015-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.02.004

## Stability Control Strategy of Multi-locomotive Coupling to Draw Liquid-solid Coupling Load

HUANG Lihui, JIANG Fan, WANG Jia

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** For the longitudinal impulse problem of HXD1C locomotive when it was drawing the oil tank marshalling in the second railway from Turpan to Korla by two locomotives coupling mode, according to the locomotive traction / brake control characteristics and field test, this paper proposed an optimized quasi-constant speed control strategy including unloading point of traction force, unloading ramp rate and speed change frequency. The proposed method can reduce the amplitude and frequency of traction force fluctuation for cutting down the longitudinal impulse because of changing the clearance between vehicle coupler and buffer or the coupler state too frequently when it is drawing the oil tank marshalling, and can keep stable operation of the locomotive, and also gives a reference to the stability control strategy of the multi-locomotive coupling to draw liquid-solid coupling load for the other type locomotives that use the quasi-constant speed control strategy.

**Keywords:** multi-locomotives coupling; quasi-constant speed control; liquid-solid coupling load; longitudinal impulse; stability control

## 0 引言

罐车作为铁路车辆的重要组成部分, 担负着运输液体、气体和粉状货物的重要任务。铁路罐车编组在运行中, 尤其是在长大坡道、起伏坡道等复杂线路的情况下, 不可避免地会出现轻微或激烈的晃动; 而罐车的不稳定会使罐体与罐内的液体产生强烈的耦合作用<sup>[1]</sup>, 这

会对牵引机车产生前后涌动。特别是准恒速控制机车, 为保持准恒速运行, 需要不断调节机车牵引力, 机车的牵引力加载和减载将与多质点罐车编组的涌动力形成共振<sup>[2]</sup>, 放大列车编组的纵向振动, 严重影响行车的平稳性、安全性, 因此准恒速控制机车的多机重联牵引液固耦合负载的平稳性控制策略显得至关重要。

HXD1C 型机车是我国铁路货运干线运输主力之一, 机车功率为 7 200 kW, 设计为准恒速控制机车, 可实现 3 机有线重联, 并从 2016 年 12 月开始配属在乌鲁木

收稿日期: 2018-01-02

作者简介: 黄利辉 (1990-), 男, 设计师, 主要从事机车网络应用软件开发工作。

齐铁路局库尔勒机务段。在吐库二线上双机有线重联牵引油罐车编组运用时，存在牵引力调节频繁、上下波动大以及主、从机车牵引力不同步的现象，造成机车纵向振动强烈，影响机车的正常运行。为此有必要进行相关试验研究，修改网络控制系统软件，优化多机重联牵引液固耦合负载的平稳性控制策略，以满足乌鲁木齐铁路局的实际运用需求。

1 吐库二线线路及机车运用情况

新疆吐库二线为吐鲁番至库尔勒的铁路线路，全长 334.1 km，为双线一级电气化铁路，设计时速等级为 160 km/h。该线路长大上坡道、起伏坡道路段较多，且包含我国当前第三长隧道——中天山隧道（长度 22.467 km），运行条件相对而言较为恶劣复杂<sup>[3]</sup>。其中库尔勒至塔什店段线路基本为上坡，坡度 7‰~13‰，上坡段约 16 km；塔什店至夏尔托热段为起伏坡道，坡度 1‰~4‰，约 60 km；夏尔托热至新井子段基本为上坡，坡度 7‰~13‰，上坡段约为 80 km；新井子至珍珠泉段基本为下坡，坡度 7‰~13‰，下坡段约为 140 km；珍珠泉至吐鲁番段基本为上坡，坡度 7‰~13‰，上坡段约为 25 km。

HXD1C 型机车主要以双机重联（WTB 连接）的模式在该线路上运用，负责货物运输，包含铁矿石、煤炭及油气资源等，机车运行速度在 70 km/h 左右，限速 85 km/h，牵引吨位不固定（2 500 t~4 500 t）。库尔勒机务段机车运用编组情况如图 1 所示，其中 HXD1C 型机车首次双机重联牵引油罐车运用。

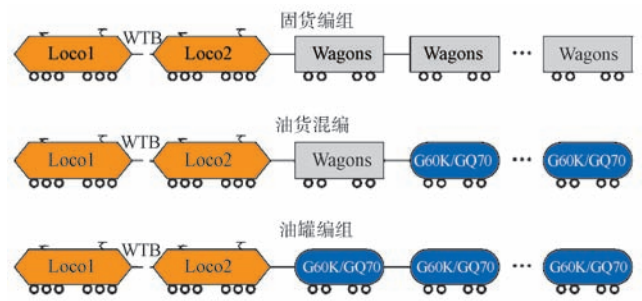


图 1 库尔勒机务段 HXD1C 型机车运用编组情况  
Fig.1 Operation status of the HXD1C locomotives marshalling in Korla depot

2 HXD1C 型机车双机重联牵引油罐编组的冲动分析

通过对 HXD1C 型机车牵引 / 制动特性研究、软件分析、现场添乘观察及数据分析发现，双机有线重联牵引油罐车纵向振动的原因存在外部和内部两大因素。在两大因素的综合影响下，最终造成机车双机重联牵引油

罐列车等编组的纵向冲动。

2.1 外部因素

外部因素主要是运行路况及液固耦合负载对机车平稳性控制的影响。根据现场试验发现，机车纵向振动多发于机车以双机重联模式牵引油罐列车编组或油货混编且运行在起伏坡道、平缓路段转上坡及长上坡后转平缓路段（变坡点—鱼背区或者锅底区<sup>[4]</sup>）时。这是由于油罐车一般装载汽油、柴油等液体（充液比一般为 60%~80%），整列车组成了一个复杂的多质点液固耦合系统，在上述路况运用时，随着列车编组不断往前运动，罐内液体易出现左右及前后晃动现象，使罐内的液体与罐体产生强烈的耦合作用<sup>[5]</sup>，对机车产生不断变化的非线性前推力或后拉力，从而使机车速度发生变化，影响机车网络控制系统牵引设定力的调节。相应路况的油罐列车编组简单理想力影响模型示意如图 2 所示。可以看到，随着列车编组不断运行，图 2（a）中油罐车涌动产生的后拉力和前推力在不断地非线性变化，图 2（b）中油罐车涌动产生的后拉力在不断地非线性变小，图 2（c）中油罐车涌动产生的后拉力在不断地非线性变大，这都对机车速度产生影响，并影响牵引力的调节。为方便展示效果，图 2 中增大了坡度，实际坡度最大为 13‰。

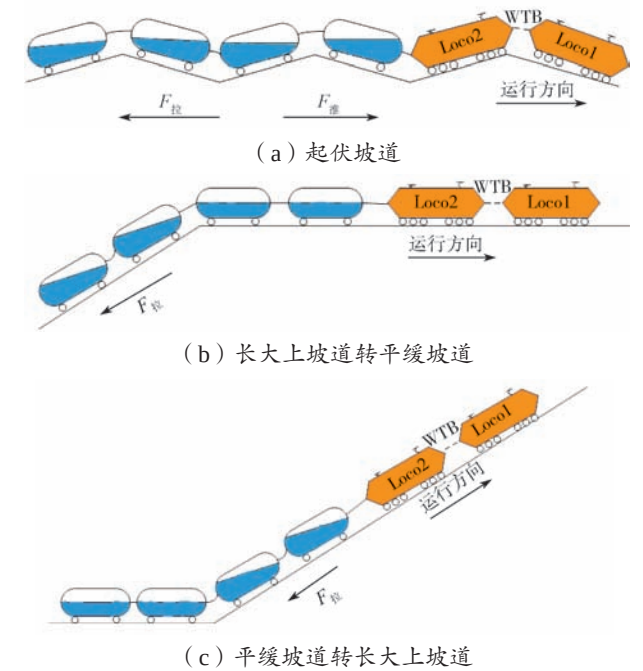


图 2 油罐列车编组简单理想力影响模型示意  
Fig.2 Simple and ideal force impact models of tanker marshalling

2.2 内部因素

电力机车准恒速控制的实现主要是当机车实际速度接近设定速度值时，机车牵引设定力将以一定的加、减载斜率参数随着实际速度的变化进行线性调节，从而确

保机车速度实际值保持在设定值附近<sup>[6]</sup>。通过对机车牵引/制动特性及控制软件研究发现,牵引工况准恒速调节时,重联信号的延时、准恒速参数的调节及编组车钩的间隙等因素对机车的纵向冲动产生影响。

(1) 多机重联信号延时

编组内主控机车的设定牵引力传输至从车时存在一定的延时。当牵引设定力变化过快时,从车将无法跟随主控机车,存在主控机车正加载而从车减载或主控车减载而从车加载的现象,严重影响机车的平稳性<sup>[7-8]</sup>。图3示出优化前某次试验HXD1C型机车牵引设定力信号传输的延时。

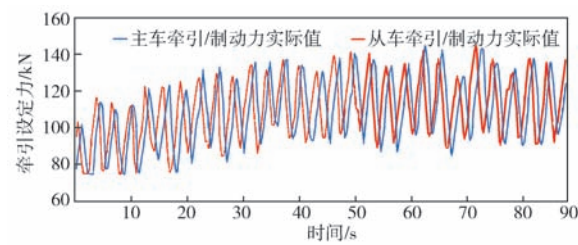
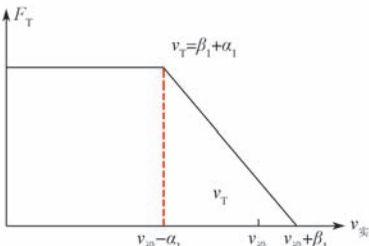


图3 优化前某次试验HXD1C机车牵引设定力信号传输延时

Fig.3 Signal transmission delay of the setting traction force for HXD1C locomotive before optimization in a test

(2) 准恒速参数的调节

牵引运行时,机车拥有2种不同的准恒速调节曲线(图4和图5)。运行过程中,机车会随实际速度的变



$v_{\text{设}}$ —机车设定速度; $v_{\text{实}}$ —机车实际速度; $F_T$ —机车牵引力

图4 机车实际速度小于设定速度时的牵引设定力与机车速度调节曲线

Fig.4 Adjustment curve between setting traction force and locomotive speed when the locomotive actual speed is less than the setting speed

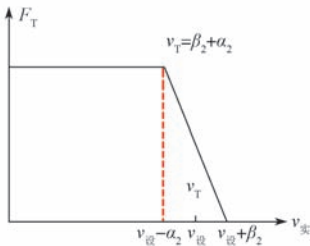


图5 机车实际速度大于(设定速度+1)时的牵引设定力与机车速度调节曲线

Fig.5 Adjustment curve between setting traction force and locomotive speed when the locomotive actual speed is more than the value of setting speed plus 1

化而来回切换交替调节,造成牵引设定力加载减载斜率反复变化,产生的牵引设定力来回突变,严重影响主、从机车的协同控制,进而影响机车的平稳性。对于多机重联牵引液固耦合负载,准恒速区间参数 $v_T$ 设置值若过小,会导致牵引设定力施加和释放频率过高,影响机车的平稳性;而机车牵引设定力固定加载减载斜率过大,则会导致牵引设定力波动幅值过大。

(3) 列车编组车钩间隙

当前国内货运列车通过压缩车钩启动,即利用车辆间的间隙和车钩间弹簧的缓冲作用使各节车辆分别启动,而不是全列车一起动作<sup>[9]</sup>。这虽会使列车较易启动且平均启动阻力较小,但也会因为车钩间隙的存在而使列车冲击力加剧。特别是在起伏坡道时,机车实际速度易超出设定速度,导致机车牵引设定力时而卸载至0、时而恢复(图4和图5),造成车钩状态频繁改变而引起列车冲动<sup>[10]</sup>。

3 优化策略

综上分析,提出一种优化控制策略以消除内外因素对机车多机重联牵引液固耦合负载的平稳控制策略影响。其优化内容包括:

(1) 减小牵引力波动频率

在多机重联牵引液固耦合负载时,只保留图4的准恒速调节曲线,删除机车准恒速调节区间参数 $v_T$ 较小的准恒速调节曲线(图5),从而确保牵引设定力加载减载斜率的稳定,以消除多个准恒速调节曲线交替调节的不良影响,降低对机车平稳性控制的影响。

(2) 降低牵引力波动幅值

根据式(1),在控制系统采样时间间隔不变的情况下,减小准恒速调节区间的牵引力加载减载斜率值,从而减小牵引力锯齿波波峰与波谷差值 $F_D$ (图6),实现牵引力波动幅值的减小。提速区间,牵引设定力锯齿波的斜率保持不变。

$$F_D=K \times T_D=\lambda \times T_D \tag{1}$$

式中: $T_D$ ——牵引力锯齿波波峰与波谷之间的时间差,s;  
 $\lambda$ ——机车牵引力加载减载斜率,kN/s; $K$ ——牵引设定力锯齿波的斜率,kN/s。

根据式(2),在牵引设定力不变的情况下,增大机车准恒速调节区间参数值,从而降低斜率 $K$ ,使其变得平缓(图7)。

$$K=\frac{F_D}{T_D}=\frac{F_T}{V_T} \tag{2}$$

式中: $F_T$ ——机车某一设定速度所发挥的最大牵引设定



力, kN;  $V_T$ ——机车准恒速调节区间参数, km/h。

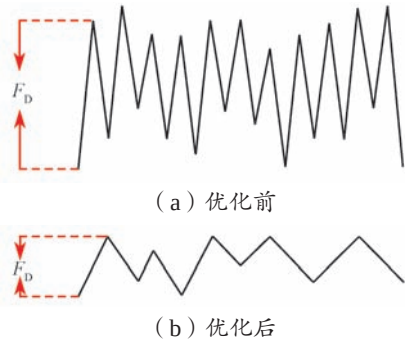


图 6 牵引力波动幅值减小  
Fig.6 Fluctuation amplitude decrease of traction force

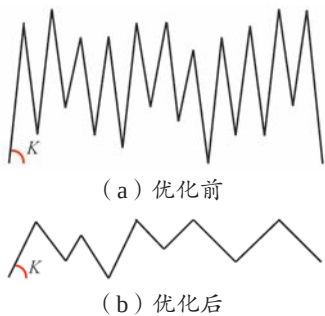
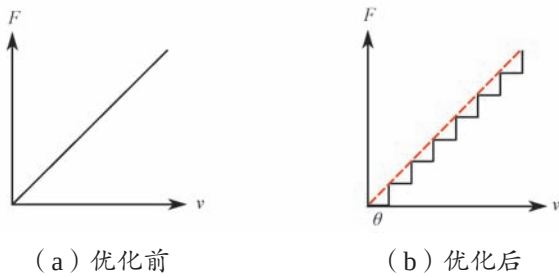


图 7 牵引力波动频率较小图  
Fig.7 Fluctuation frequency decrease of traction force  
(3) 减小实际速度变化频率

在准恒速调节区间, 机车实际速度的变化将会导致牵引设定力的变化, 因此只要降低了实际速度的变化频率, 便可以实现降低牵引设定力的变化频率, 使实际牵引力在一定时间内保持不变, 机车更加平稳。为此, 在多机重联牵引多质点液固耦合负载模式下, 对采用准恒速调节的机车实际速度进行阶梯性调节 (图 8), 则机车下一时刻的实际速度为

$$v_{i2} = \begin{cases} v_{i1} & , \quad v_{i2} < v_{i1} \pm \theta \\ v_{i1} \pm \theta & , \quad v_{i2} \geq v_{i1} \pm \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_{i2}$ ——机车  $t_2$  时刻实际速度值, km/h;  $v_{i1}$ ——机车  $t_1$  时刻实际速度值, km/h;  $\theta$ ——机车下一时刻实际速度可跳变参数值, km/h。



(a) 优化前 (b) 优化后  
图 8 牵引设定力及速度变化  
Fig.8 Changes of the traction force and speed

(4) 降低车钩状态变化率

当机车实际速度大于机车设定速度  $\beta$  时, 机车牵引设定力不会卸载至 0, 而是保持较小牵引力  $F_p$  (图 9),

由此减少车钩状态改变次数、确保车钩一直处于拉伸状态, 以降低车钩与缓冲器间隙冲动和多质点液固耦合负载前后涌动所产生的共振影响, 使列车编组平稳运行。

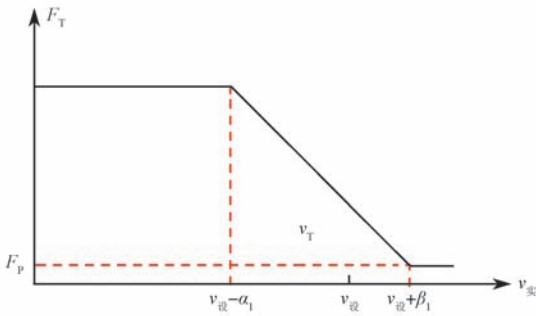


图 9 优化后准恒速调节  
Fig.9 Quasi-constant speed adjustment after optimization

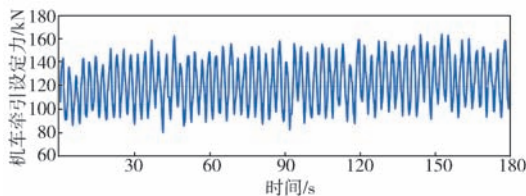
4 软件优化后运行效果

软件优化前, HXD1C 机车编组双机重联牵引油罐车编组, 库尔勒至吐鲁番往返, 途中会出现十几次涌动 (纵向冲动) 现象, 司机及乘务人员若不扶住相关固定物, 将无法站稳; 而且持续时间长, 司机须将回主司控器手柄回零等手动干预才能使机车逐渐稳定, 影响司机操作, 同时对车辆车钩也有着一定的影响。

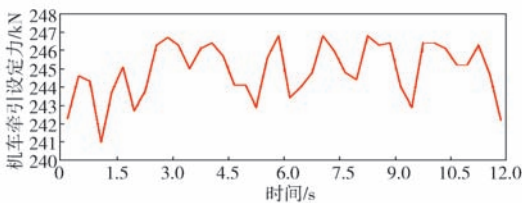
经过长时间现场动态运行试验, 最终软件优化后机车在吐库二线运行良好 (表 1), 基本无纵向冲动的影响。图 10 示出优化前后机车牵引设定力波动幅值及时间对比。

表 1 软件优化后运行效果

| Tab.1 Running effect after the software optimization |         |        |                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------|---------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 试验序号                                                 | 运行区段    | 油罐内液体物 | 运行效果                                                                                                              |
| 1                                                    | 库尔勒至吐鲁番 | 原油     | 运行中机车常规纵向冲动基本消失, 还存在 1 次非常轻微涌动, 但可以接受; 同时, 机车牵引力上下波动范围值从 50 kN 降至 5 kN 左右 (图 10), 而且持续时间从分钟级降至秒级, 可实现自动稳定, 无需司机干预 |
| 2                                                    | 吐鲁番至库尔勒 | 汽油     | 列车编组一路运行良好, 全程无纵向冲动                                                                                               |
| 3                                                    | 库尔勒至鱼儿沟 | 原油     | 列车编组一路运行良好, 全程无纵向冲动                                                                                               |
| 4                                                    | 库尔勒至吐鲁番 | 原油     | 列车编组一路运行良好, 全程无纵向冲动                                                                                               |
| 5                                                    | 库尔勒至吐鲁番 | 柴油     | 列车编组一路运行良好, 全程无纵向冲动                                                                                               |



(a) 优化前



(b) 优化后

图 10 优化前后机车牵引设定力波动幅值及时间对比  
Fig.10 Comparison of setting traction force fluctuation amplitude and time of the locomotive with the original and optimized softwares

5 结语

针对乌鲁木齐铁路局的HX<sub>D</sub>1C 机车多机重联牵引油罐车编组等液固耦合负载的平稳性需求，对机车当前准恒速控制方式及现场数据进行了分析，提出一种准恒速等液固耦合负载的平稳性控制策略，并在当前HX<sub>D</sub>1C 机车双机重联牵引油罐编组上进行了运行试验。结果显示，其控制效果良好，为类似的准恒速控制机车在多机重联牵引多质点液固耦合负载的平稳性控制提供了参考。

参考文献：

[1] 陈海俊. 铁路罐车液固耦合问题数值方法研究 [D]. 大连：大

连交通大学，2008.  
[2] 李显生，孟祥雨，郑雪莲，等. 非满载罐体内液体冲击动力学特性 [J]. 吉林大学学报 (工学版)，2017，47(3)：737-743.  
LI X S, MENG X Y, ZHENG X L, et al. Dynamic characteristics of liquid sloshing in partially-filled tank [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(3): 737-743.  
[3] 袁蕾. 吐库二线开通运营 [N]. 新疆日报 (汉)，2014-12-29(001).  
[4] 程叶鲜. 防止列车冲动的操纵方法浅探 [J]. 科技情报开发与经济，2010，20(22)：212-214.  
CHENG Y X. Probe into the Controlling Method for Preventing the Train Impulse [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2010, 20(22): 212-214.  
[5] 李松. 油罐车液体晃动动力特性研究 [D]. 成都：西南交通大学，2006.  
[6] 熊红康. HX<sub>D</sub>3C 型电力机车牵引客运列车减少冲动的探讨 [J]. 机电传动，2013(3)：91-93.  
[7] 李希宁. 多机重联机车的定速控制的方法、装置及可读存储介质 [Z]. 株洲：中车株洲电力机车有限公司，2018.  
[8] 陈建黎，池茂儒，朱昊，等. 机车编组方式对列车纵向冲动的影响 [J]. 内燃机车，2012(11)：23-28，48.  
[9] 张万睿. 关于对使用HX<sub>D</sub>3C 型电力机车牵引货物列车在南曹线平稳优化运行方案的探讨 [J]. 山东工业技术，2015(5)：34-35.  
[10] 樊冬宝. 浅析组合列车的平稳操纵 [C] // 北京铁路局技师论文集，2009.

(上接第 14 页)

6 结语

轨道交通客运车辆电气智能化控制单元具有车辆电气控制、线路综合保护、器件状态监测、电能质量分析及设备执行与维护诊断等功能，并由核心控制模块的嵌入式操作系统完成各功能。本文设计的基于 Xenomai 的 Linux 嵌入式操作系统既拥有 Linux 的多任务处理能力、丰富的网络制式通信、成熟可靠的图形处理与电能质量监测分析算法，又具备极佳的定时器中断任务调度能力、优异的内核态实时性以及良好的用户态实时性，满足微机化电气屏柜系统功能及性能需求。

参考文献：

[1] 陈鹏宇. 韶山 3 型 4000 系电力机车逻辑控制单元的设计与加装改造 [D]. 成都：西南交通大学，2017.  
[2] 高洋. 电力机车逻辑控制装置的研究与设计 [D]. 合肥：合肥工业大学，2005.  
[3] 王曦. 内燃机车无触点改造及智能模块的研究与开发 [D]. 北京：北京交通大学，2008.  
[4] BOGGS M S, FULTON T L, HAUSMAN S, et al. Programmable

logic controller customized function call method, system and apparatus: U.S. Patent 6,904,471 [P]. 2005-06-07.  
[5] ERICKSON K T. Programmable logic controllers [J]. IEEE potentials, 1996, 15(1)：14-17.  
[6] 高鹏飞，李新明，孙建. Linux 与 VxWorks 任务调度机制分析 [J]. 工业控制计算机，2005(6)：30-32.  
GAO P F, LI X M, SUN J. Analysis of Linux and VxWorks Task Scheduling Mechanism [J]. Industrial Control Computer, 2005(6)：30-32.  
[7] 李月军，陈刚. 浅析 VxWorks 和 Linux 嵌入式实时操作系统 [J]. 科技创新导报，2010(14)：36-38.  
[8] BARBALACE A, LUCHETTA A, MANDUCHI G, et al. Performance comparison of VxWorks, Linux, RTAI, and Xenomai in a hard real-time application [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(1)：435-439.  
[9] 王延伟. 基于 Xenomai 的实时 Linux 嵌入式机器人控制平台设计 [D]. 济南：山东大学，2012.  
[10] 韩守谦，裴海龙，王清阳. 基于 Xenomai 的实时嵌入式 Linux 操作系统的构建 [J]. 计算机工程与设计，2011(1)：96-98，102.  
HAN S Q, PEI H L, WANG Q Y. Construction real-time embedded Linux operating system based on Xenomai[J]. Computer Engineering and Design, 2011(1)：96-98,102.  
[11] 王荣，游有鹏，张少坤. 基于 Xenomai 的实时 Linux 分析与研究 [J]. 单片机与嵌入式系统应用，2009(2)：9-11.  
WANG R, YOU Y P, ZHANG S K. Study on Real-time Linux Based on Xenomai [J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2009(2)：9-11.