

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.017

高速列车牵引电机的同步虚拟主轴控制*

丁 立, 方攸同*, 蒋 毅
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对高速列车牵引电机的同步控制问题, 分析了系统同步性对于列车运行状态的影响, 并比较了不同控制策略的优势与不足, 提出了利用虚拟主轴控制满足列车牵引系统高同步性的需求的方案, 在 Matlab 中结合传统的虚拟主轴控制理论及列车牵引电机实际运行情况, 对传统虚拟主轴控制模型控制参数做出调整, 对启动阶段的控制策略进行了优化, 建立了一个包含四台永磁牵引电机的同步控制系统模型。利用所建模型分析了系统发生负载扰动, 负载不平衡等情况下转速, 转矩, 转速差, 转角差的变化情况, 并分析了系统保持同步的临界条件。研究结果表明, 将虚拟主轴控制策略应用在高速列车牵引电机的同步控制之中, 有着同步性高、响应迅速等优点, 该控制策略有着良好的应用前景。

关键词: 高速列车牵引电机; 虚拟主轴控制; Matlab 建模与仿真

中图分类号: TH39; TM3 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1311-05

Electronic line-shafting control for high speed train traction motors

DING Li, FANG You-tong, JIANG Yi
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the coordination of high speed railway traction motor, the effect of system synchronization of train working performance as well as the advantages and disadvantages of different control strategies was analyzed. Electronic virtual line-shafting was chosen for it could maintain coordination for most operating conditions. Combined with traditional electronic virtual line-shafting (EVLS) theory and the working situation of traction motors, the traditional EVLS controlling model was optimized and a model which contains four motors was built in Matlab. The model was used to analysis the system performance under load disturbance and imbalance situation. The critical condition of the system coordination was analyzed too. The results indicate that using electronic line-shafting technique in controlling train traction motors has the advantages of high coordination, fast response has a good application prospect.

Key words: high speed trains traction motors; virtual line-shafting control; modeling and simulation in Matlab

0 引 言

高速动车组一般是指运营时速 350 km 以上, 运量大, 密度高, 距离长的新一代高速列车。以主流的 CRH02 型高速列车为例, 其能在 200 km/h~300 km/h 速度区间内正常运行。列车运行时, 采用 8 节编组, 4 动 4 拖的分布。其中 8 个编组又被分为 2 个动力单元, 每个动力单元包含 2 个动车和 2 个拖车^[1-2]。

随着我国高速列车系统的发展, 越来越多的列车由传统的内燃机或者单电机驱动转变为多电机同步驱动。列车牵引电动机和普通电动机的一个不同之处是在同一列车上的数台牵引电动机, 不论在电的方面还是机械方面都是连接在一起的。因此, 同一台机车上牵引电动机特性有差异, 个别轮对发生“空转”、“滑行”等原因, 均有可能造成各电机的负载分配不均, 有的电机处于过载运行, 有的电机又处于欠载运行状态, 从而使机车牵引力不能充分发挥, 增加了运

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA11A101); 浙江省钱江人才计划资助项目(2013R10031)

作者简介: 丁 立(1990-), 男, 浙江杭州人, 主要从事永磁电机控制及电机本体分析方面的研究。E-mail: dingli2003@sina.com

通信联系人: 方攸同, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: youtong@zju.edu.cn

行成本,也使得对于各电机的精确控制变得更为困难。在列车运行的情况下,如果不能利用电同步而需要利用机械力保持同步,将会加剧列车部件的损耗,轻则会增加维护成本,严重的更可能会导致安全隐患^[3]。所以随着高速铁路系统的发展,找到一种适用于高速列车的有着良好同步性的多电机同步控制策略也变得越来越重要。

常见的电同步控制方式主要有主令同步、主从同步、交叉耦合同步、虚拟主轴同步等等。主令控制和主从控制电机之间耦合程度较低,不适合于对同步性能要求较高的场合。交叉耦合同步控制(Cross Coupling Control)系统中电机之间耦合程度较高,但是数据处理较为复杂,主要用于两台电机间的同步控制。虚拟主轴同步控制(Electronic Virtual Line-Shafting, EVLS),通过控制算法模拟机械主轴,从而实现各个单元之间的同步^[4-5]。这种同步控制方式能根据系统输入的转速信号做出快速响应,同时能较好地保持各个电机之间的同步性。

本研究将虚拟主轴控制应用到高速铁路牵引包机中,并用Matlab等软件进行仿真。

1 虚拟主轴控制原理

虚拟主轴控制最早由Lorenz教授和Meyer教授提出^[6]。主要目的是通过这种新的控制策略使电同步模拟出类似于传统机械主轴控制的优秀机械刚性以及系统稳定性,以克服转速变化时瞬态转速的不同步所导致的系统失同步。同时也保留了电同步控制适用性强,维护简单的特点。

传统的机械主轴控制之中,各个电机通过齿轮箱以及锥形滑轮和一个机械主轴相连实现耦合。其系统结构图如图1所示。控制过程中,这一系统通过机械主轴实现了信号的双向传递。而齿轮部分除了传动之外,也有着使系统中不同额定速度的电机之间同步运动的功能^[7]。

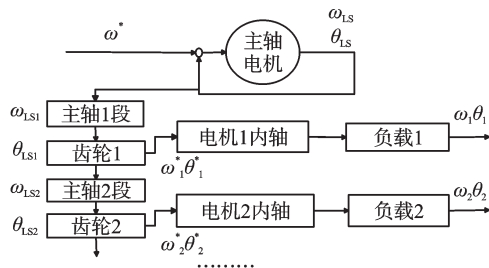


图1 机械主轴控制示意图

本研究对于虚拟主轴控制使用虚拟的控制模拟的“主轴”来替代实际的机械主轴,使电机在反馈速度

的同时,反馈各个电机转矩之和,有:

$$T - \sum T_i = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1)$$

式中: T —虚拟主轴的转矩, T_i —各个电机内轴的反馈转矩, J —转动惯量。

在机械主轴中, J 由主轴的物理特性决定,而在虚拟主轴中, J 需要根据使用场合由使用者设置,其代表着虚拟主轴中所储存的能量。一般而言 J 越大稳态性能越好,但是其动态响应会变慢,影响虚拟主轴输出追踪输入的能力^[8]。

而主轴的转矩 T 则可以通过下式得到:

$$T = K_m(\omega_r - \omega_n) + K_{rm} \int (\omega_r - \omega_n) dt \quad (2)$$

式中: K_m —主轴刚度, K_{rm} —机械内轴衰减系数。

不过由于后一项较小,在很多文献中都选择忽略^[9]。

在虚拟主轴控制中,本研究加入了各个电机的转矩作为反馈,同时输出的控制信号除了转速信号还加入了转角信号,使得不同输出转矩的电机也能较好地保持同步。根据文献介绍以及之后所做的仿真实验,仅当所需输出转矩超过电机额定转矩1.7倍以上的情下,才会开始出现失同步的情况^[10]。

2 仿真模型的建立

本研究对CRH02型高速列车牵引电机系统进行建模。首先基于矢量控制建立的单电机控制模型如图2所示。笔者在单电机控制中使用 $i_d=0$ 控制,设 $i_d^*=0$,通过转速差和转角差加权得到 i_q^* ,之后通过坐标变换得到abc相电流的输入值,并通过逆变器输入给电机。其中在 i_q^* 的计算中,速差和转角差两者在计中的加权系数在机械主轴中是由主轴和连接器决定的。而在虚拟主轴之中则可以人为设定。由于控制目标是良好的同步性,且考虑到实际使用中需要减少机械连接损耗的需要,在建模过程中增加转角信号的比重,使得转角和转速之比为6:1。

本研究建立的主轴在Matlab中的模型如图3所示。在建模过程中由于式(2)的形式和PI控制器的数学形式基本相同,所以为了简化建模过程就考虑使用PI控制器模块来完成主轴转矩 T 的计算。通过这个办法,在不改变系统传递函数关系的前提下,简化了建模过程。

考虑到虚拟主轴系统中,其所虚拟的主轴速度和电机真实转速无直接关联。故在加速阶段会出现主轴的转速与转角和电机实际有较大的差值。转速差值并不会对控制系统有较大影响,但是转角由于是转

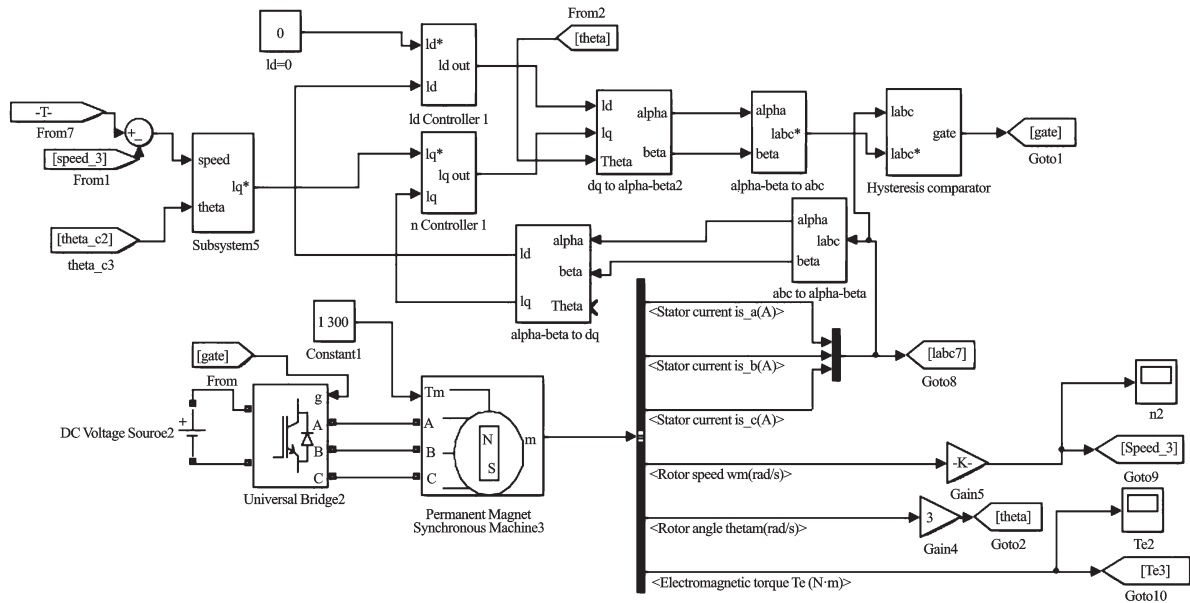


图2 Matlab中单电机控制模型

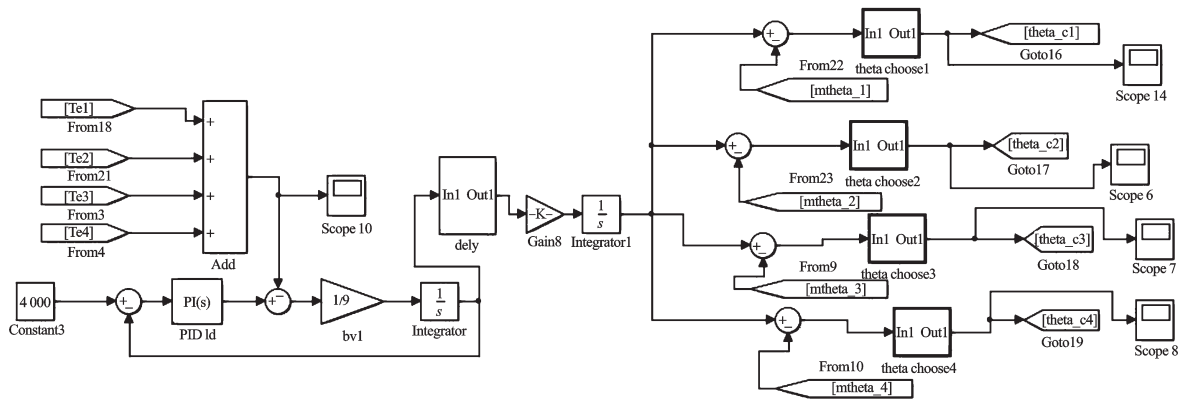


图3 Matlab中主轴模型

速的积分,且牵引电机加速有一个过程,并不能瞬间到达设定的转速,同时列车一般设定转速较高。所以在经过加速过程之后,主轴和电机内轴的转角会有较大的差值,而如果通过系统本身对差值进行调节则会出现较大的超调,超调值可能会达到设定转速的130%。这在实际的列车运行中是不允许的。解决办法由两个:一是采用目标转速逐渐增加的办法,使主轴和电机内轴同步,但这种办法设定的加速度难以确定,过大则依然会出现超调,过小则增长加速过程,且电机无法发挥最大转矩。另一种是在启动过程中仅考虑转速环进行控制,启动过程基本结束后,再加入转角环同时给转角环一个补偿值,来抵消之前加速过程中积累的转角差。这种方法能较好地利用电机最大转矩,较快的加速到达设定转速,同时也可以有效地消除加速过程结束之后的超调。

最后本研究结合上述两部分模型,得到一个包含4台电机的虚拟主轴控制系统。

3 仿真结果与分析

本研究基于上述模型进行仿真,首先测试模型对于负载扰动的响应性能。笔者设定4台电机的转速为4 000 r/min,初始负载为1 300 N·m,0 s时4台电机初始速度都为0,开始带负载启动,分别在1.5 s,3 s,5 s时刻对电机1施加100 N·m,-50 N·m,-130 N·m的负载扰动,并在8 s时结束扰动,负载恢复为初始的1 300 N·m。整个过程之中,电机2,3,4的负载始终保持为1 300 N·m,仿真结果如图4、图5所示。

从图4和图5中可以看出,在启动和稳定运行阶段,当无负载扰动时4台电机之间都能保持较好的同步,且启动过程也较平稳和迅速,同时在启动结束也没有出现明显的超调,有着良好的启动性能。其在全过程中输出的转矩和设定的相同。当负载扰动出现后,系统内有扰动和无扰动电机之间的转速差十分不明显。

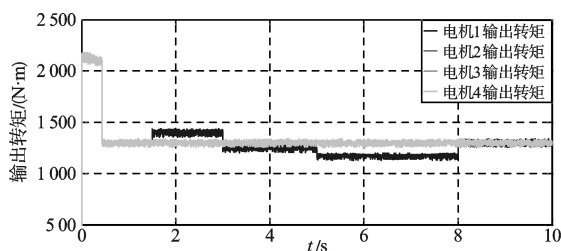


图4 负载干扰下电机输出转矩

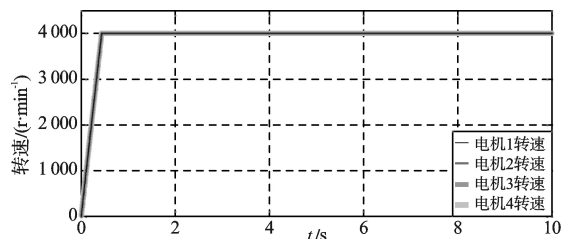


图5 各电机转速

负载干扰下电机间转速差和转角差如图6、图7所示。进一步观察图6、图7可以看到所产生的转速差十分微小,而由于转速差所产生的转角差也十分微小,不超过0.02 rad,表现出虚拟主轴控制良好的同步性,且在出现扰动后,转速差和转角差都有着明显的回复到稳定状态的趋势。

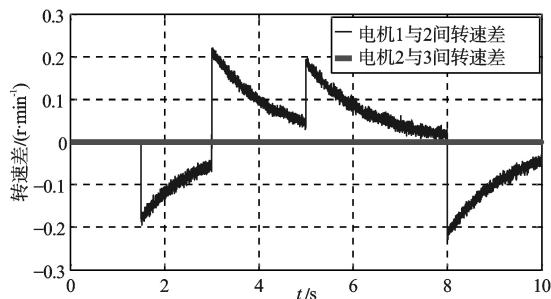


图6 负载干扰下电机间转速差

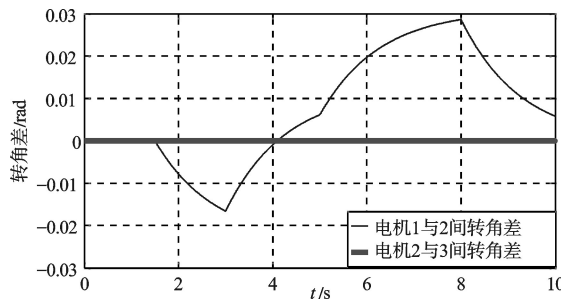


图7 负载干扰下电机间转角差

考虑到列车运行时除了负载扰动还可能不存在车轮大小不均、摩擦等因素导致的负载不平衡,仿真系统在4台电机不同负载的情况下的运行情况。4台电机设定的初始额定速度为4 000 r/min,4台电机在1.5 s后分别加入不同的负载扰动,同时结合列车实际运行的情况,加入速度变化。在1.5 s时加速,加速度

为40 rad/s²,在4 s时加速度变为-200 rad/s²,6 s时再变为-50 rad/s²,之后在8 s时加速过程结束,恢复匀速运行。

不平衡负载下电机输出转矩如图8所示。从图8可以看出4台电机在加速过程结束了之后被施加了不同的负载转矩和不同的转矩扰动。各电机转速如图9所示。从图9可以看到在负载不平衡的情况下,4台电机在加、减速时依然能保持良好的同步性,基本能保持同样的转速,不会出现明显的失同步。

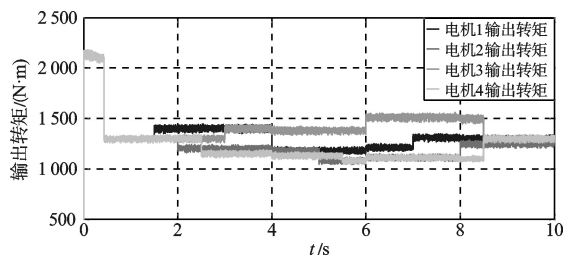


图8 不平衡负载下电机输出转矩

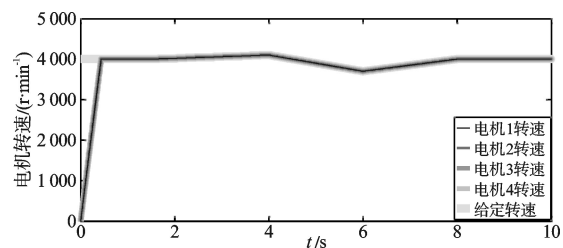


图9 各电机转速

负载不平衡下电机间转速差和转角差如图10、图11所示。通过对于图10所示电机间转速差和图11所示电机间转角差的分析可以看到,随着负载的扰动,电机间会出现转速和转角差,但是最大的转速差仅为额定转速的0.17%,而最大的转角差仅为0.3 rad且随着扰动结束,转速差和转角差都有着回零的趋势。结合以上4张图可以看出,即使列车处于负载不平衡状态,通过虚拟主轴控制也可以使牵引电机间保持良好的同步。

为了分析虚拟主轴控制能保持系统同步的控制范围,本研究进一步进行仿真。初始状态4台电机均带1 300 N·m的负载,在3 s时对电机1施加转矩负载,不断重复并加大所加负载,直到系统出现失同步,得到的结果如图12所示。可以看到当负载为2 200 N·m时系

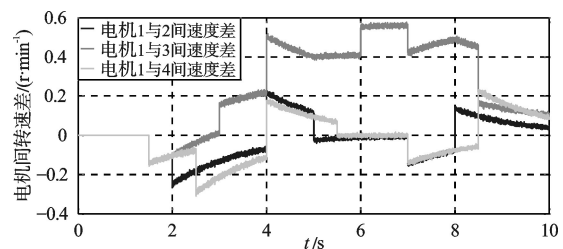


图10 负载不平衡下电机间转速差

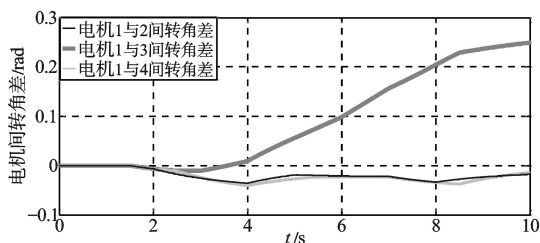


图11 负载不平衡下电机间转角差

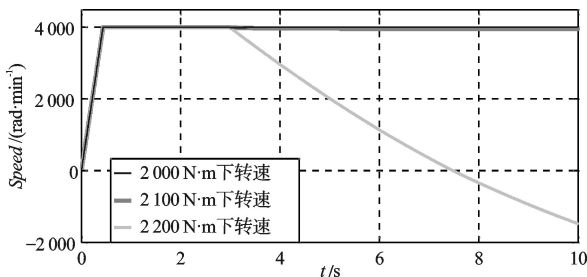


图12 不同负载下电机1转速

统才开始出现失同步,当负载继续增加时,电机1将出现明显的转速下降。可以看到虚拟主轴控制有着控制范围广的优势。当负载扰动小于额定转矩1.7倍的情况下,4台电机之间都还能保持相同转速。而在实际情况中,这么大的转矩扰动出现的概率很小。

4 结束语

本研究的主要工作是将虚拟主轴控制应用到了高速铁路牵引电机之中,并且进行了建模仿真。通过仿真结果可以看出:

(1) 虚拟主轴控制应用在列车牵引电机上有着响

应迅速,同步性好,适用范围广等优点。

(2) 高速列车牵引电机和传统的虚拟主轴控制应用场合有一定的不同,但通过对于加速过程的单独控制以及对于转角和转速比重的调节,能使得其适用于高速列车的应用条件。

参考文献(References):

- [1] 邓小军. 国产化CRH2型200 km/h动车组及技术创新[J]. 机车电传动, 2008(1): 1-6.
- [2] 顾春杰, 韦巍, 何衍. 基于RT-LAB的高速动车组牵引传动系统实时仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 218-222.
- [3] 巩思茜. 高速列车永磁牵引电机同步控制建模与仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2013.
- [4] Perez-Pinal, F. J., et al. Comparison of Multi-motor Synchronization Techniques[C]//Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE. Piscataway: [s.n.], 2004: 1670-1675.
- [5] 范岩. 多电机同步控制策略的改进[J]. 机电工程, 2007, 24(6): 65-66, 82.
- [6] 蒋毅. 多永磁电机传动系统的同步控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学电气学院, 2014.
- [7] 肖亮亮. 基于虚轴法的多轴同步运动控制系统设计[D]. 杭州: 浙江理工大学机械与自动控制学院, 2010.
- [8] Perez-Pinal, F. J. Improvement of the Electronic Line-shafting[C]//Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual. Aachen: [s.n.], 2004: 3260-3265.
- [9] 李晓明, 李鹏翔. 基于虚轴法的高速液压同步控制策略研究[J]. 液压与气动, 2008(11): 32-36.
- [10] VALENZUELA M A, LORENZ R D. Electronic line-shafting control for paper machine drives[J]. **Pulp and Paper Industry Technical**, 2001, 37(1): 158-164.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

丁立, 方攸同, 蒋毅. 高速列车牵引电机的同步虚拟主轴控制[J]. 机电工程, 2014, 31(10): 1311-1315.

DING Li, FANG You-tong, JIANG Yi. Electronic line-shafting control for high speed train traction motors[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(10): 1311-1315.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1290页)

- [6] LIN W Y, SHEN C L, HSIAO K M. A case study of the five-point double-toggle mould clamping mechanism[J]. **Proc. Inst. Mech. Eng. C-J. Mech.**, 2006, 220(4): 527-535.
- [7] 欧笛声, 周雄新, 朱萍. 双曲肘五孔斜排合模机构的设计改进[J]. 广西工学院学报, 2005, 16(4): 19-23.
- [8] 任工昌, 苗新强, 郭志刚. 注塑机双肘杆锁模机构的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2009(1): 18-19.
- [9] 叶友东, 郑玉琴, 汪选要. 基于Matlab的节能注塑机合模机构多目标寻优研究[J]. 机械设计与制造, 2011(10): 182-184.
- [10] 王诗强, 谢鹏程, 何雪涛, 等. 基于Matlab的注塑机合模机

构优化设计及系统开发[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(5): 54-57.

- [11] 袁云龙. 基于遗传算法的注塑机肘杆机构优化设计[J]. 机电工程, 2009, 26(4): 22-24.
- [12] HUANG M S, LIN T Y, FUNG R F. Key design parameters and optimal design of a five-point double-toggle clamping mechanism[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2011(35): 4304-4320.
- [13] 任彬, 张树有, 谭建荣. 双曲肘连杆式合模装置数字样机刚柔耦合问题求解方法[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 133-139.

[编辑: 程浩]