DOI: 10.3901/JME.2018.01.120

TBM 机电耦合建模与同步控制策略对比分析*

霍军周 吴瀚洋 朱冬 孙伟 鲍有能
(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 为了保证 TBM 掘进过程中各电动机扭矩同步输出, 确定合适的控制策略尤为重要。机电耦合动力学模型考虑各齿轮的动态负载和同步控制策略下电动机输出扭矩之间的耦合关系, 能够更加精确地计算主驱动系统动态特性。因此以 TBM 突变冲击动态载荷为输入, 基于主驱动系统机电耦合动力学模型, 分别对转矩主从控制和转速跟随控制下各电动机扭矩输出同步性和齿轮的三向振动情况进行了分析。分析结果表明: 采用转矩主从控制策略时, 由于直接对电动机输出扭矩进行干预调整。在其控制下各电动机能够更好地保证输出扭矩的一致性, 同时减少齿轮的三向振动。而采用转速并联控制时, 由于各电动机之间相对独立。系统通过同步转速而被动协调输出转矩, 这导致系统同步性能较差, 其在同一时刻输出扭矩的最大差异为转矩主从控制策略下的 3.5 倍左右。这种转矩的异步输入直接恶化了齿轮的振动情况。大齿圈径向振动增大了 2 倍以上, 这极易造成齿轮齿面断裂, 齿轮轴扭断等安全事故。

关键词: TBM; 主驱动系统; 动态特性; 控制策略

中图分类号: TP391

TBM Electromechanical Coupling Modeling and Comparative Analysis of Synchronous Drive Control Strategy

HUO Junzhou WU Hanyang ZHU Dong SUN Wei BAO Youneng
(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: To keep the motors' torque synchronously during tunneling, the proper control strategy is very important. The electromechanical coupling dynamic model takes the coupling relation between the dynamic load of each gear and the output torque of the motor under the synchronous control strategy into consideration which makes the calculation results more accurately. Based on the TBM electromechanical coupling dynamic model, the synchronization of motors' output torque and three-dimension vibration condition are analyzed under torque master-slave and rotate speed parallel control with impact dynamic loads on cutterhead. The results show that: The torque master-slave control strategy is used to adjust the motors' output torque directly which makes the synchronization of the motor output torque better rather than rotate speed parallel control. The gears' three-dimension vibration is smaller, respectively. When using the rotate speed parallel control, the motor is relatively independent. The system can coordinate the output torque through the synchronous speed, which results in the poor synchronization performance. The maximum difference is 3.5 times of torque master-slave control's. This kind of asynchronous input torque will directly worse the gear's vibration situation. The ring gear's radial vibration is twice larger, which will leads to the broken surface of gear and shaft torsion failure.

Key words: TBM; main drive system; dynamic characteristics; control strategy

0 前言

全断面硬岩掘进机(Tunnel boring machine, TBM)是集掘进、排渣、衬砌等功能为一体的隧道掘进大型复杂成套装备, 是全断面掘进装备中技术难

度最大的掘进装备。TBM 主驱动系统是 TBM 最核心部件。它是由滚刀群、刀盘分体、刀盘支撑体、主轴承、主驱动支撑体、冗余驱动机构等组成的大尺寸复杂系统。TBM 主机系统在掘进过程中承受多源载荷输入, 刀盘前端在掘进中会遇到大埋深(1 600 m 以上), 高硬度(350 MPa 以上), 高石英含量(70%)的极端围岩边界环境^[1-2]。这种极端的环境以及滚刀群分布式多点破岩的特点使得各小齿轮的动态负载也具有强烈的突变特点。在实际的掘进过

* 国家自然科学基金(51375001)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB35400)、国家辽宁省科技攻关课题(2015106016)和辽宁省优秀人才课题(LJQ2014005, LJQ2014075)资助项目。20170302 收到初稿, 20170502 收到修改稿

程中, 往往采用扭矩主从控制和转速并联控制的方法^[3-4]来保证各个电动机的驱动同步性, 防止出现个别电动机过载的情况。针对 TBM 的负载特点选择合适的同步驱动控制策略直接影响驱动系统的稳定性, 寿命和掘进性能, 能够有效减少 TBM 主机关键承力部件发生严重的工程问题的可能性。

目前有关 TBM 主驱动系统动力学研究主要侧重于刀盘和齿轮的动态特性。在针对 TBM 主驱动系统动力学研究之前, 学者们对盘形滚刀破岩过程及其动态特性进行了大量研究。HUO 等^[5]考虑滚刀结合面刚度和滚刀轴承非线性特性建立了滚刀-刀座系统多自由度动力学模型, 并基于真实比例的滚刀加载试验对模型进行了验证。这为主驱动系统动态特性的计算分析提供了输入载荷。基于输入载荷, 考虑刀盘各分体的受力建立了 TBM 刀盘系统多自由度耦合动力学模型及裂纹扩展模型, 着重对刀盘的振动和损伤机理进行了分析^[6-8]。ZHANG 等^[9-10]基于主驱动系统动力学模型对各齿轮在复杂载荷作用下的均载特性和系统稳定性进行了研究。研究发现盾构机前端强烈的载荷突变会引起各齿轮负载差异突变, 这是造成驱动系统电动机轴失效的最主要问题。以上模型均未考虑电动机扭矩的异步输入, 各电动机的输入扭矩被简化为均载, 这使得计算得到的主驱动系统的动态特性与真实情况差距较大。HUO 等^[11]考虑 TBM 从刀盘到撑靴各自由度之间的耦合关系建立了多点冲击载荷下主机系统动力学模型, 并基于现场振动实测首次对模型进行了对比验证。WU 等^[12]考虑各齿轮的不均匀负载和控制策略, 将动力学模型中计算得到的动态负载作为控制系统的干扰输入, 将控制系统计算得到的动态输出扭矩代入动力学模型进行迭代求解。由此建立了主驱动系统机电耦合动力学模型, 使得计算得到的主驱动系统动态特性更加准确。刘然等^[13]基于转矩跟随的策略建立了主驱动系统电气控制数学模型, 并在其基础上改进控制策略建立了环形耦合控制策略, 使得多电动机系统的同步性能提高。

目前针对突变载荷下 TBM 主驱动系统动态特性的研究往往从机械或控制的角度进行, 割裂了两系统直接的耦合关系, 使得其动态特性较真实情况差距较大。而基于机电耦合动力学模型的设计因素分析较少。利用该模型对 TBM 实际制造中最常采用的两种控制策略进行对比, 分析两种控制策略下输出扭矩的同步性和齿轮的振动情况。从而得到更适合 TBM 典型负载特点的控制策略, 这为 TBM 主驱动系统的抗振设计提供了参考。

1 驱动系统机电耦合动力学模型

TBM 的破岩由刀盘旋转和主机推进两个动作完成。掘进时, 撑靴撑紧洞壁, 主推进油缸向前伸出推动主梁做轴向进给运动。刀盘的旋转动作主要由主驱动系统驱动。刀盘由钢板焊接而成, 包括刀盘面板, 支撑筋和背板三部分。滚刀安装在刀盘面板上, 直接与岩石接触进行挤压破岩。刀盘法兰在刀盘背板上, 通过螺栓将主轴承动圈, 大齿圈固结在一起。大齿圈的旋转直接带动刀盘旋转。大齿圈的旋转则是由八个平行小齿轮同步驱动。各小齿轮由三相异步电动机提供扭矩输入。TBM 主驱动系统的主要组成如图 1 所示。

图 1 TBM 主要结构

根据 TBM 主驱动系统的结构和工作原理, 建立 TBM 主驱动系统等效机电耦合动力学模型^[10-12]如式(1)所示(图 2)。等效动力学模型采用集中质量法建立, 质点的划分主要包括刀盘, 大齿圈, 各小齿轮, 各驱动电动机和支撑壳体。各质点之间以弹簧-阻尼相连。其中, 大齿圈与支撑壳体的刚度为主轴承的径向刚度, 该刚度的计算中考虑了轴承的非线性接触力^[14]。大齿圈与各小齿轮之间通过时变啮合刚度连接, 该刚度的计算考虑齿轮的制造, 装配误差, 齿侧间隙^[15]。

$$\begin{cases}
 m_L \ddot{X}_L + C_{lrx}(\dot{X}_L - \dot{X}_r) + k_{lrx}(X_L - X_r) = F_X \\
 m_L \ddot{Y}_L + C_{lry}(\dot{Y}_L - \dot{Y}_r) + k_{lry}(Y_L - Y_r) = F_Y \\
 m_r \ddot{X}_r + \sum_{i=1}^N (F_{pri} + D_{pri}) \sin(\varphi_i + \alpha) + C_{eqr}(\dot{X}_r - \dot{X}_d) + \\
 C_{lrx}(\dot{X}_r - \dot{X}_L) + k_{eqr}(X_r - X_d) + k_{lrx}(X_r - X_L) = 0 \\
 m_r \ddot{Y}_r - \sum_{i=1}^N (F_{pri} + D_{pri}) \cos(\varphi_i + \alpha) + C_{eqr}(\dot{Y}_r - \dot{Y}_d) + \\
 C_{lry}(\dot{Y}_r - \dot{Y}_L) + k_{eqr}(Y_r - Y_d) + k_{lry}(Y_r - Y_L) = 0 \\
 m_{pi} \ddot{X}_{pi} + (F_{pri} + D_{pri}) \cos \alpha + C_{eqpi} \dot{X}_{pi} + k_{eqpi} X_{pi} = 0 \\
 m_{pi} \ddot{Y}_{pi} + (F_{pri} + D_{pri}) \sin \alpha + C_{eqpi} \dot{Y}_{pi} + k_{eqpi} Y_{pi} = 0 \\
 m_d \ddot{X}_d + C_{eqr}(\dot{X}_d - \dot{X}_r) + C_{eqd} \dot{X}_d + k_{eqr}(X_d - X_r) + k_{eqd} X_d = 0 \\
 m_d \ddot{Y}_d + C_{eqr}(\dot{Y}_d - \dot{Y}_r) + C_{eqd} \dot{Y}_d + k_{eqr}(Y_d - Y_r) + k_{eqd} Y_d = 0
 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{mi}\ddot{\theta}_{mi} + C_{mpQ}(\dot{\theta}_{mi} - \dot{\theta}_{pi}) + k_{mpQ}(\theta_{mi} - \theta_{pi}) = T_{pi} \\ I_{pi}\ddot{\theta}_{pi} + (F_{pri} + D_{pri})r_{bp} + C_{mpQ}(\dot{\theta}_{pi} - \dot{\theta}_{mi}) + k_{mpQ}(\theta_{pi} - \theta_{mi}) = 0 \\ I_r\ddot{\theta}_r - \sum_{i=1}^N (F_{pri} + D_{pri})r_{br} + C_{rL}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_L) + k_{rL}(\theta_r - \theta_L) = 0 \\ I_L\ddot{\theta}_L + C_{Lr}(\dot{\theta}_L - \dot{\theta}_r) + k_{Lr}(\theta_L - \theta_r) = -T_L \end{cases} \quad (2)$$

式中, m, I, X, Y 分别表示不同构件的质量, 转动惯量, 横向和纵向位移。下标 L, r, p, d, m_i 分别表示刀盘, 大齿圈, 小齿轮, 盾体和电动机。 $k_{lr}, k_{eqr}, k_{eqpi}, k_{eqd}, k_{mpQ}, k_{Lr}$ 分别表示刀盘横纵向支撑刚度, 主轴承径向刚度, 小齿轮径向支撑刚度, 盾体径向支撑刚度, 小齿轮与传动轴扭转刚度和刀盘扭转刚度。 F_{pri}, D_{pri} 分别为齿轮动态啮合力和阻尼力。 T_L, T_{pi}, T_x, T_y 分别为刀盘等效负载总扭矩, 各驱动电动机输入扭矩, 刀盘等效横纵向不平衡力, 等效纵纵向不平衡力。

(a) 横等效动力学模型

(b) 纵等效动力学模型

(c) 扭转等效动力学模型

图2 等效动力学模型

主驱动系统的控制系统数学模型的建模过程是: 首先基于三相异步电动机的基本方程组建立变频控制下的异步电动机数学模型。然后根据具体的控制策略建立个电动机之间的控制策略。电气控制系统以动态负载为干扰输入, 输出各电动机的动态扭矩。最后, 基于机械系统和电气控制系统之间的动态负载-输出扭矩的实时信息交互建立机电耦合动力学模型。其交互关系如图3所示。

图3 负载-扭矩耦合关系

2 主驱动系统同步控制策略

主驱动系统采用的控制策略需要对各平行驱动电动机的输出扭矩进行同步控制。目前 TBM 中普遍采用的控制策略包括扭矩主从控制和转速并联控制两种, 如图4所示。其中, 扭矩主从控制主要是保留主电动机的转速环, 同时保留了各电动机自身的扭矩环。利用主电动机的输出扭矩作为从电动机的扭矩环指令信号, 从而保证了主电动机与从电

(a) 扭矩主从控制

(b) 扭矩跟随控制

图4 控制策略框图

动机的转矩同步。而转速并联控制策略则保留了各电动机转速环,同时各电动机共享转速环指令信号,使得各电动机的输出转速保持一致。在齿轮系统的机械结构限制下,间接保证了各电动机间扭矩的自动均衡分配。基于上述两种控制策略分别构建数学模型,代入模型计算。

3 计算实例分析

以辽西北工程 T_6 段使用 Robbins TBM 为例,其主驱动系统主要参数,标段岩石参数和掘进参数如表 1、2 所示。应用上述机电耦合动力学模型对主驱动系统动力学响应进行计算,求解方法采用 Newmark 方法。

表 1 主驱动系统主要结构参数

参数	数值
刀盘质量/kg	128 000
大齿圈齿数	174
小齿轮齿数	14
大齿圈质量/kg	846
小齿轮质量/kg	69.6
模数/mm	22
压力角/(°)	20
齿宽/m	0.285
电动机额定功率/kW	350

表 2 主要掘进参数和地质参数

参数	数值
刀盘转速/(r/min)	5.6
推进速度/(m/h)	3
岩石抗压强度/MPa	93.6
岩石密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 750

3.1 刀盘载荷模拟

刀盘滚刀主要分为中心刀,正滚刀和边滚刀三类。三类滚刀因为其在刀盘上分布位置的不同,其受力情况各不相同。三类滚刀的力主要包括滚刀垂直力 F_v , 滚动力 F_r , 侧向力 F_s 。假设滚刀向刀盘载荷传递过程没有能量损耗,即刀盘承担的等效载荷等于所有滚刀的受力之和。本文采用 Ls-dyna 数值分析方法^[16-18]结合实测滚刀载荷^[19-20],对给定刀盘转速和主机推进速度下滚刀的载荷进行仿真,从而获取各类滚刀的动态载荷。将单把滚刀的载荷向刀盘合成得到刀盘等效载荷。将各刀盘横向,纵向和扭转等效载荷如图 5 所示,将其输入动力学模型作为载荷激励。

3.2 输出扭矩对比分析

TBM 主驱动系统中电动机输出轴常由于电动机输出扭矩的不均衡而发生扭断。机电耦合动力学

图 5 输入刀盘等效载荷

模型充分考虑了刀盘前端载荷及主驱动结构造成的各齿轮负载不均特性,同时考虑各不均匀负载对于主驱动控制系统的扰动。而在不同的控制策略下电动机输出轴受力特性明显区别。在强冲击突变载荷作用下两种控制策略下各连接轴输出扭矩如图 6 所示同时刻输出扭矩差异最大值和最大振幅的统计值如表 3 所示。

图6 各电动机输出扭矩

表3 输出扭矩统计(N·m)

	同时刻最大差异	最大幅值
扭矩主从控制	756	396
转速并联控制	2 764	1 375

如图6、表3所示:在扭矩主从的控制策略下,控制系统尽可能地保证各电动机的输出扭矩一致,因此各电动机的输出扭矩被系统干预调节至相近。因此在各电动机的实际负载差异较大时,系统的实际输出扭矩波动相对转速并联控制下较小。以第一个计算周期为例,各电动机中在同一时刻的最大差异达到756 N·m,达到其平均输出扭矩的49%,最大幅值为396 N·m。而在转速并联的控制策略下,

各电动机共享同一个转速控制信号,各电动机直接相对独立。各电动机的实际负载直接决定了各电动机的输出扭矩。在TBM前端极端突变载荷的冲击下,各小齿轮负载容易出现差异较大的情况。这直接导致了转速并联控制策略下,各电动机的实际输出扭矩差异很大。同一时刻各电动机最大差异达到2 764 N·m,约为其平均扭矩的180%,最大幅值为1 375 N·m,约为扭矩主从控制策略下的3.5倍左右。因此针对TBM突变负载的特点,采用扭矩主从控制策略进行多电动机同步驱动能够较好地实现扭矩输出同步的目标。

3.3 齿轮振动对比分析

大齿圈与小齿轮之间的啮合动态特性直接影响着刀盘旋转的稳定性和齿轮的寿命。在两种控制策略下,大齿圈和小齿轮的三向位移情况明显区别,如图7所示。

从图7和表4可得:在扭矩主从的控制策略下,由于各电动机的输出扭矩差异较小,小齿轮和大齿圈的径向位移波动也较小,其最大幅值分别达到 6.46×10^{-3} mm和 1.67×10^{-2} mm。反之,在转速并联的控制策略下,小齿轮和大齿圈的最大振幅明显较大,分别达到 1.16×10^{-2} mm和 5.41×10^{-2} mm,分别达到扭矩主从策略下的1.8和3.2倍。同时,其径向振动表现出强烈的周期性波动。在扭转方向,两种控制策略下,大齿圈和小齿轮的振动差异相对较小。扭矩主从控制策略下,小齿轮的扭转振动最大振幅较转速并联控制下大20%,而大齿圈扭转振动最大振幅则小45%左右。因此,采用扭矩主从的控制策略较转速并联明显改善了主驱动系统中齿轮的振动情况。使得TBM的工作更加稳定,抗振性能更好。

(a) 小齿轮横向位移

(b) 小齿轮纵向位移

(c) 小齿轮扭转位移

(d) 齿圈横向位移

(e) 齿圈纵向位移

(f) 齿圈扭转位移

图 7 齿轮三向振动

表 4 振动振幅统计(mm)

	转矩主从控制	转速并联控制
小齿轮横向/m	6.46×10^{-6}	8.47×10^{-6}
小齿轮纵向/m	6.09×10^{-6}	1.16×10^{-5}
小齿轮扭转/rad	0.001 2	0.001 0
大齿圈横向/m	1.03×10^{-5}	3.84×10^{-5}
大齿圈纵向/m	1.67×10^{-5}	5.41×10^{-5}
大齿圈扭转/rad	4.50×10^{-6}	8.24×10^{-6}

4 结论

基于 TBM 主驱动系统机电耦合动力学模型,对转矩主从控制和转速跟随两种控制策略下各电动机的输出扭矩同步性和齿轮振动情况进行了计算分析。分析结果表明:针对 TBM 突变重载的特点,采用转速主从控制策略直接对电动机输出扭矩进行干预调整。在其控制下主驱动系统的同步性能较转矩跟随策略要好。各电动机中在同一时刻的最大差异达到 $756 \text{ N}\cdot\text{m}$, 最大幅值为 $396 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。而采用转矩跟随的控制策略,通过控制各电动机转速一致而被动协调转矩的方法不能达到较好的效果。在刀盘旋转过程中,当各齿轮负载差异很大时,各电动机的输出扭矩随之明显异步。同一时刻各电动机最大差异达到 $2\,764 \text{ N}\cdot\text{m}$, 最大幅值为 $1\,375 \text{ N}\cdot\text{m}$, 约为转矩主从控制策略下的 3.5 倍左右。这种扭矩的异步输入直接恶化了齿轮的振动情况。特别是大齿圈径向振动增大了 2 倍以上。

后续工作将在以下几方面展开。

(1) 着重对两种控制策略下,载荷突变时刻各电动机的同步性能进行分析研究。

(2) 结合机电耦合动力学模型,对现有的同步驱动优化策略进行改进,使得主驱动系统各电动机的同步性能提高。

参 考 文 献

[1] CESANO D, OLOFSSON B, BAGTZOGLU A C.

Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels—a statistical study of the Bolmen tunnel in Southern Sweden[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2000, 15(2): 153-165.

[2] HOME L. Improving advance rates of TBMs in adverse ground conditions[J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2009, 2(2): 157-167.

[3] LIU R, SUN J Z, LUO Y Q, et al. Research on multi-motor synchronization control based on the ring coupling strategy for cutterhead driving system of shield machines[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 52-54: 65-72.

[4] 赵刚, 刘德全. 盾构机刀盘多电动机同步驱动研究[J]. 广东造船, 2012, 31(6): 73-77.

ZHAO Gang, LIU Dequan. Synchronously research of the shield machine cutter drive[J]. Guangdong Ship Building, 2012, 31(6): 73-77.

[5] HUO J Z, HOU N, SUN W, et al. Analyses of dynamic characteristics and structure optimization of tunnel boring machine cutter system with multi-joint surface[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 87(1): 237-254.

[6] HUO J Z, ZHU D, HOU N, et al. Application of a small-timescale fatigue, crack-growth model to the plane stress/strain transition in predicting the lifetime of a tunnel-boring-machine cutter head[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 71: 11-30.

[7] 凌静秀, 孙伟, 霍军周, 等. TBM 刀盘系统动态特性及参数影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4): 598-602.

LING Jingxiu, SUN Wei, HUO Junzhou, et al. Dynamic characteristics of TBM cutterhead system and its parametric influence[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(4): 598-602.

[8] HUO J Z, ZHU D, WANG W, et al. Theoretical crack growth prediction model for thick plate butt welding

- joints based on stress/strain transitions[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(3): 1-16.
- [9] ZHANG K, YU H, LIU Z, et al. Dynamic characteristic analysis of TBM tunnelling in mixed-face conditions[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2010, 18(7): 1019-1031.
- [10] ZHANG K Z, YU H D, ZENG X X, et al. Numerical simulation of instability conditions in multiple pinion drives[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(6): 1319-1327.
- [11] HUO J Z, WU H Y, YANG J, et al. Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(8): 3043-3058.
- [12] WU H Y, HUO J Z, ZHANG W, et al. An electromechanical coupling model of TBM's main driving system[C]// American Society of Mechanical Engineers. International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, August 29-31, 2016, Auckland, New Zealand: ASME, 2016: 1-6.
- [13] LIU R, LI W, SUN J, et al. Research on compliance control for cutterhead driving system of shield machines[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(1): 401-408.
- [14] SHI X, WANG L. TEHL analysis of high-speed and heavy-load roller bearing with quasi-dynamic characteristics[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(4): 1296-1304.
- [15] 张凯之. 盾构机冗余驱动回转系统动态特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- ZHANG Kaizhi. Study on dynamic characteristics of redundantly driven revolving system of shield TBM[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [16] HUO J Z, WANG W Z, SUN W, et al. The multi-stage rock fragmentation load prediction model of tunnel boring machine cutter group based on dense core theory[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1-4): 277-289.
- [17] ZHANG Z H, MENG L. Design theory of full face rock tunnel boring machine transition cutter edge angle and its application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 541-546.
- [18] 周思阳, 亢一澜, 苏翠侠, 等. 基于力学分析的 TBM 掘进总推力预测模型研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 76-82.
- ZHOU Siyang, KANG Yilan, SU Cuixia, et al. Prediction of thrust force requirements for TBMs based on mechanical analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(20): 76-82.
- [19] JAMAL R. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction[J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2008, 1(1): 18-28.
- [20] GERTSCH R, GERTSCH L, ROSTAMI J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(2): 238-246.
-
- 作者简介: 霍军周, 男, 1979 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为软土及硬岩 TBM 系统设计、性能驱动的机械零部件结构优化设计及测试及复杂机械结构疲劳裂纹扩展及抗损设计。
E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn
- 吴瀚洋(通信作者), 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为动力学建模及抗振设计。
E-mail: wuhanyang@mail.dlut.edu.cn