

文章编号:1000-582X(2011)03-001-06

盾构机双驱动大功率行星齿轮的传动原理及特性

林超,宿新红,秦大同

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆400044)

摘要:在研究盾构机及行星齿轮机构的基础之上,针对盾构机刀盘驱动系统,提出一种新型盾构机双驱动大功率行星齿轮传动系统,分析了传动系统的原理及其结构;建立了新型传动系统的运动学模型,对该系统的传动特性进行了分析,获得了系统的传动比、系统内部的转速、扭矩的关系和变化规律;通过对比简化实验得到的结果与理论计算得到的结果,其变化规律基本一致,验证了数学模型及分析方法的正确性。双驱动大功率行星齿轮传动系统具有传动比大、承载能力强的特点,能实现低转速、大扭矩输出的功能,满足盾构机的基本工作要求,不仅可取代传统的多个电机同时驱动多个减速器的传动系统,还能实现3种不同型式的盾构机传动系统功能。

关键词:盾构机;齿轮;原理;行星齿轮传动;运动学;传动特性

中图分类号:TH132.41

文献标志码:A

Gearing theory and transmission characteristic for dual drive planetary transmission system with large capacity of shield machine

LIN Chao, SU Xin-hong, QIN Da-tong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: On the basis of studying shield machine and planetary transmission, to address cutting drive system of shield machine, a novel dual drive planetary transmission system with large capacity is presented, and its principle and structure are analyzed. Through establishing a new kinematical model of the transmission system and analyzing its characteristics, the transmission ratio, rev and torque relationship and changing rules within the system are acquired. By comparing the simplified experimental results with theoretical results, it is shown that the variation is basically the same, which verifies the correctness of the model and analysis method. The high-power dual-driven planetary gear transmission system with great transmission ratio, strong carrying capacity, can perform the function of low-speed and high-torque output, and meet basic requirements of shield machine. It can not only replace the traditional multi-driven transmission system, but also achieve the transmission function in three different types of shield machine.

Key words: shield machine; gear; principle; planetary gear transmission; kinematics; transmission characteristic

盾构机是一种专用于地下工程的技术密集型重大工程机械^[1-2],由于盾构施工具有机械化程度高、施工速度快、质量保障、安全性高、实用性广、对地面

建筑影响少及有利于环保等优点^[3-4],已被广泛应用于地铁、铁路、公路、市政及水电等隧道工程^[5]。20世纪90年代以来,泥水平衡式盾构机、土压平衡

收稿日期:2010-10-16

基金项目:国家“863”计划重点资助项目(2007AA041802)

作者简介:林超(1958-),男,重庆大学教授,博士,主要从事机械设计计算机辅助工程、齿轮传动系统的设计、分析与制造、新型齿轮传动的研究,(E-mail) linchao@cqu.edu.cn。

式盾构机已成为世界范围的主流产品^[6]。相比较而言,泥水平衡式盾构机要求输出扭矩^[7-8]较大,并且刀盘直径越大,要求驱动系统输出扭矩越大^[9-10]。随着盾构机技术的发展,行星齿轮机构在盾构机刀盘驱动系统中得到广泛应用,它传动比大,承载能力强,可以实现低速大扭矩输出^[11-12]。长期以来,国外的 Wirth, Tamrock, V-AB, Atlas Copco 等公司,大都采用由多个电机同时驱动多个 2 级 2K-H 型串联行星减速器的传动系统;中国在引进、消化国外技术的基础上,提出了用于土压平衡盾构机的多个电机驱动多个大功率 3 级 2K-H 型串联行星减速器的传动系统^[13]。这 2 种方案都能够实现低速大扭矩输出,能通过改变驱动电机的个数满足阻力矩变化较大的要求;但是都需要多个电机同时驱动多个行星减速器,故结构复杂、体积庞大,且存在不同步问题。笔者提出一种双驱动大功率行星齿轮传动系统,分析了传动系统的运动,得到该系统的传动特性。该系统传动比大、调速范围宽、承载能力强,可实现低速大扭矩输出的功能,满足盾构机阻力矩变化大的工作要求,并且整体体积小,结构简单,还可有效解决不同步问题;同时用一套双驱动传动系统还可实现大中型泥水平衡式、中小型土压平衡式、大型土压平衡式等 3 种型式的盾构机传动系统功能。

1 传动系统的原理及结构

双驱动大功率行星齿轮传动系统主要由驱动电机、制动器、行星减速器及大轴承组成。驱动电机(1、2)输入的动力,经行星减速器(3、4)调整后,与大轴承(5)相连,再通过刀盘支撑架(6)带动刀盘(7)旋转,其结构组成如图 1 所示。

双驱动大功率行星齿轮传动系统的组成主要包括以下 5 个部分:

1) 驱动电机,电动机 a、b 分别驱动差动行星齿轮机构的太阳轮和齿圈。

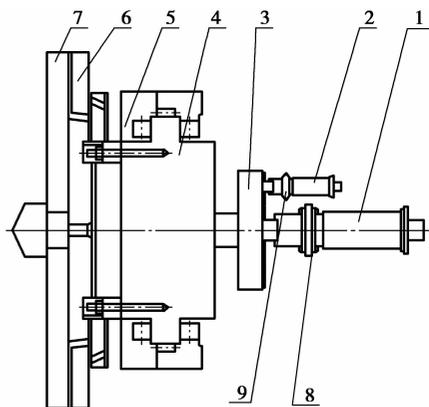
2) 制动器,制动器 1、2 分别制动电动机 a、b,调节电动机的输出转速。

3) 差动行星齿轮机构,对输入功率和主运动进行汇流,同时起到减速的作用。

4) 封闭行星齿轮机构,增大传动比,调整转速到所需要的工作转速,并且对输入功率和运动进行分流,由双级齿圈齿轮共同承担载荷。

5) 大轴承,与刀盘支撑相连接,带动刀盘旋转。

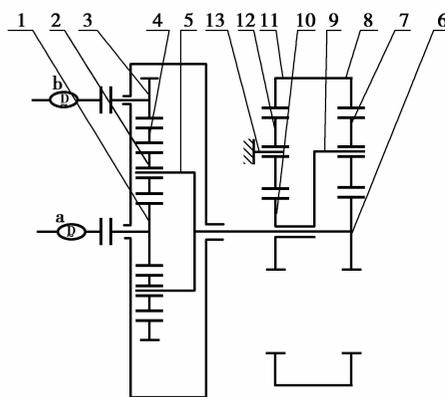
在双驱动大功率行星齿轮传动系统中,行星减速器做为其核心部件,主要由差动行星齿轮机构和封闭行星齿轮机构所构成,如图 2 所示。电动机 a 输入



1—电动机 a; 2—电动机 b; 3—差动行星齿轮机构;
4—封闭行星齿轮机构; 5—大轴承; 6—刀盘支撑架;
7—刀盘; 8—制动器 1; 9—制动器 2

图 1 盾构机双驱动大功率行星传动系统的结构组成

的动力源通过轴传递给太阳轮 I(1),电动机 b 输入的动力源,通过外齿轮(3)传递给齿圈 I(4),然后由行星架 I(5)驱动太阳轮 II(6),实现差动机构对输入功率和运动的汇流功能;输入封闭机构的动力通过双路径传递,一部分由齿圈 II(8)输出,另一部分由行星架 II(9)驱动太阳轮 III(10),最后由齿圈 III(11)输出,实现封闭机构的功率分流功能,而且载荷由齿圈 II、齿圈 III 共同承担,从而增强承载能力。



1—太阳轮 I; 2—行星轮 I; 3—外齿轮; 4—齿圈 I;
5—行星架 I; 6—太阳轮 II; 7—行星轮 II; 8—齿圈 II;
9—行星架 II; 10—太阳轮 III; 11—齿圈 III;
12—行星轮 III; 13—行星架 III

图 2 减速器的传动简图

2 数学模型的建立

根据机械原理,采用行列式分析轮系运动学的方法,结合双驱动大功率行星传动系统减速器的传动简图(图 2),建立该减速器的联系图,如图 3 所示。

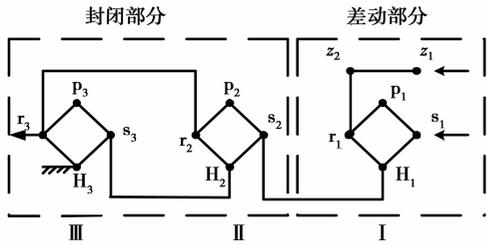


图 3 减速器的联系图

图中 s_1 、 p_1 、 H_1 、 r_1 分别表示行星轮系 I 中的中心轮、行星轮、行星架和齿圈, z_1 表示外齿轮 (3) 的齿数, z_2 表示齿圈 I (4) 的外齿齿数。该减速器由 2k-H 型轮系 I、II、III 和一个定轴轮系构成, 并且轮系 I 的 H_1 与轮系 II 的 s_2 相连, 轮系 II 的 H_2 与轮系 III 的 s_3 相连, 轮系 III 的 H_3 固定在机体上。图中标出太阳轮 s_1 和外齿轮 (3) 为输入构件, 齿圈 r_2 和 r_3 为输出构件, 故该系统为双输入单输出系统。

s 、 p 、 H 、 r 构成的 2k-H 型行星轮系, 其中心轮 s 、 r 及行星架 H 的角速度之间的关系满足下列行列式方程:

$$\begin{vmatrix} z_s & -n_r \\ z_r & n_s \end{vmatrix} - n_H \begin{vmatrix} z_s & -1 \\ z_r & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (1)$$

定轴轮系, 两相啮合齿轮的角速度之间的关系满足下列行列式方程:

$$\begin{vmatrix} z_1 & \pm n_2 \\ z_2 & n_1 \end{vmatrix} = 0 \text{ (“+” 表示内啮合, “-” 表示外啮合)}. \quad (2)$$

结合齿轮传动理论可知

$$n_B = \frac{n_A}{i_{AB}}, T_B = -i_{AB} T_A, \quad (3)$$

式中: z_s 表示太阳轮的齿数; z_r 表示齿圈的内齿齿数; n_s 、 n_r 、 n_H 分别表示太阳轮、齿圈及行星架的转速; n_A 、 n_B 分别表示构件 A、B 的转速; T_A 、 T_B 分别表示构件 A、B 承受的转矩; i_{AB} 表示构件 A 与 B 的转速比。

由式(1)、(2)、(3)分别可推导差动部分和封闭部分的传动比关系、转速关系及扭矩关系(见表 1)。

表 1 传动比、转速及扭矩关系表

齿轮机构	传动比	转速关系	扭矩关系
差动部分 (电机 a 制动)	$i_{dH_1} = -\left(1 + \frac{z_{s_1}}{z_{r_1}}\right) \frac{z_2}{z_1}$	$n_{H_1} = -\frac{n_b}{\left(1 + \frac{z_{s_1}}{z_{r_1}}\right) \frac{z_2}{z_1}}$	$T_{H_1} = -\left(1 + \frac{z_{s_1}}{z_{r_1}}\right) \frac{z_2}{z_1} T_b$
差动部分 (电机 b 制动)	$i_{s_1 H_1} = 1 + \frac{z_{r_1}}{z_{s_1}}$	$n_{H_1} = \frac{n_a}{1 + \frac{z_{r_1}}{z_{s_1}}}$	$T_{H_1} = -\left(1 + \frac{z_{r_1}}{z_{s_1}}\right) T_a$
差动部分 (差动输入)	$i_{H_1 r_1}^{H_1} = \frac{z_{r_1} z_2}{z_{s_1} z_1}$	$n_{H_1} = \frac{n_a}{1 - \frac{z_{r_1} z_2}{z_{s_1} z_1}} + \frac{n_b}{1 - \frac{z_{r_1} z_2}{z_{s_1} z_1}}$	$T_{H_1} = -\frac{(P_a \pm P_b)}{n_{H_1}} \times 9\ 550$
封闭部分	$i_i = 1 - \left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right)$	$n_{r_2 r_3} = \frac{n_{s_1}}{1 - \left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right)}$	$T_{r_2 r_3} = \left[\left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right) - 1\right] T_{s_1}$

根据以上分析及表 1 中的结果, 可建立双驱动大功率行星齿轮传动系统的数学模型。

$$\left. \begin{aligned} \text{总传动比: } i_{\Sigma} &= \left[1 - \left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right)\right] i_{H_1}, \\ \text{总输出转速: } n_{\Sigma} &= \frac{n_{H_1}}{1 - \left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right)}, \\ \text{总输出扭矩: } T_{\Sigma} &= \left[1 - \left(1 + \frac{z_{r_2}}{z_{s_2}}\right) \left(1 + \frac{z_{r_3}}{z_{s_3}}\right)\right] T_{H_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: i_{H_1} 为差动部分的传动比, 当驱动形式不同有 3 种不同的形式(见表 1); T_{H_1} 为差动部分的输出扭

矩; n_{H_1} 为差动部分的输出转速。

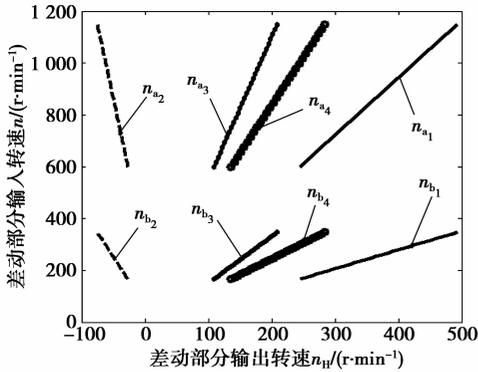
3 传动特性分析

根据上述双驱动大功率行星齿轮传动系统的分析及建立的数学模型, 以实例见表 2 所示的参数, 研究其输出特性。恒功率调速能实现低转速、大扭矩的功能^[14]。

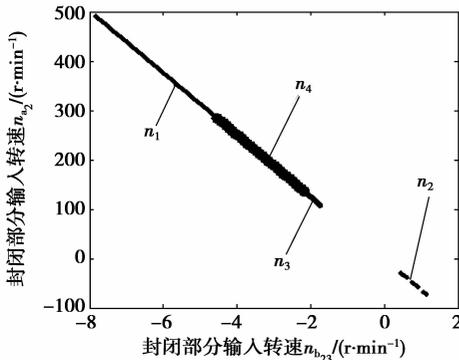
表 2 减速器基本参数表

符号	差动部分			封闭部分					定轴部分		
	z_{s_1}	z_{r_1}	z_{p_1}	z_{s_2}	z_{r_2}	z_{p_2}	z_{s_3}	z_{r_3}	z_{p_3}	z_2	z_1
齿数	25	113	44	17	127	55	19	119	50	164	41

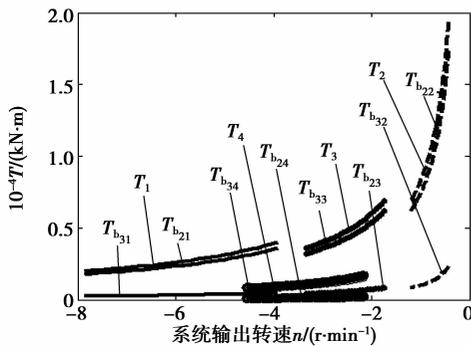
选用电机 a(功率 $P_a=1\ 255\ \text{kW}$ 、转速范围 $600\sim 1\ 150\ \text{r/min}$)、电机 b(功率 $P_b=385\ \text{kW}$ 、转速范围 $665\sim 1\ 390\ \text{r/min}$)为输入,按表 2 中的参数,用 matlab 软件进行理论计算,得到双驱动大功率行星齿轮传动系统转速、扭矩的关系及变化规律,见图 4。



(a) 差动部分输入、输出转速关系



(b) 封闭部分输入、输出转速关系



(c) 系统输出转速、扭矩关系

$T_{b_{2j}}$ 、 $T_{b_{3j}}$ 、 T_j 分别为第 2 个、第 3 个行星排及系统总输出扭矩; n_{a_j} 、 n_{b_j} 分别为系统的输入转速; n_j 为系统总输出转速; $j(j=1, 2, 3, 4)$ 表示第 j 种工况

图 4 双驱动大功率行星齿轮传动系统输出特性图

由图 4(a)分析可知,在双驱动大功率行星传动系统中,差动部分有太阳轮和齿圈 2 个输入构件,行星架一个输出构件,从而起到运动和功率的汇流作用;改变驱动方式,得到 4 种输出结果,故差动部分

还起到变速的作用。两电机同向输入,可获得很大的传动比,且输出转速方向与电机转速方向相反。两电机反向输入,其输出转速与电机 A 的输入转速一致。由图中曲线的斜率可知,输出转速随电动机 a 转速变化快,随电动机 b 转速变化较慢。

由图 4(b)分析可知,在双驱动大功率行星传动系统中,封闭部分起到增大传动比的作用,且输出转速方向与输入转速方向相反。输入封闭部分的功率利用 2 条路径传递,一部分由行星排 II 输出,另一部分功率通过行星排 II 传递给行星排 III 输出,实现功率分流的功能。载荷由行星排 II 和行星排 III 的齿圈共同承担,齿圈 II 承受的载荷约占总载荷的 13%,齿圈 III 承受的载荷约占总载荷的 87%,从而增强了系统的承载能力。行星排 II 主要用于功率分流,还承担小部分载荷,行星排 III 主要用于承担载荷。

由图 4(c)分析可知,该传动系统传动比大、调速范围宽、承载能力强,可实现大型泥水平衡式、中小型土压平衡式、大型土压平衡式等 3 种盾构机传动系统的功能。双驱动大功率行星齿轮传动系统通过改变电机的驱动方式,可实现 4 种输出工况,系统驱动方式与输出工况的关系,见表 3。

表 3 输出工况与驱动方式关系表

输出工况	电机的驱动方式
1	电动机 a、b 均启动,转速方向相反
2	电动机 a、b 均启动,转速方向相同
3	电动机 a 启动,电动机 b 制动
4	电动机 a 制动,电动机 b 启动

盾构机工作过程中,阻力矩变化不大时,可通过调节转速来满足阻力矩变化的需要;若阻力矩变化较大时,可通过改变 a、b 电机的驱动方式,满足阻力矩变化的需要;当只有 b 电机驱动时,其输出扭矩较小,转速较低,可用于盾构机微动工作。故该传动系统满足盾构机的基本工作要求,可实现传统的多电机驱动系统的功能。

两电动机同向输入时,系统输出转速最低接近 $0.43\ \text{r/min}$,此时输出扭矩可达 $20\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}$,可适用于大型泥水平衡式盾构机;两电动机反向输入时,系统输出转速范围为 $3.9\sim 7.8\ \text{r/min}$,输出扭矩范围为 $2\ 000\sim 4\ 000\ \text{kN}\cdot\text{m}$,可适用于中小型土压平衡式盾构机;只有 a 电机驱动时,其输出转速和所能承担的扭矩介于两者之间,可用于大型土压平衡盾构机中。

双驱动大功率行星齿轮传动系统不仅使整体

体积减小,结构简单,还可有效解决不同步问题,并在理论研究上可实现 3 种盾构机传动系统的功能。

4 实验分析

根据盾构机双驱动大功率行星齿轮传动系统的原理和特点,设计参数如表 4 所示的简化类比实验,以性能测试为主,探索在多种工况下系统内部转速和扭矩的性能测试实验。

表 4 实验装置的基本参数表

符号	太阳轮 z_s	行星轮 z_p	内齿圈 z_r	辅齿轮 z_2	辅齿轮 z_1
齿数	18	27	72	148	76

实验条件,采用 2 台直流调速电机驱动减速器、转速扭矩传感器及加载器等按实验方案布置在实验台上^[15],如图 5 所示。

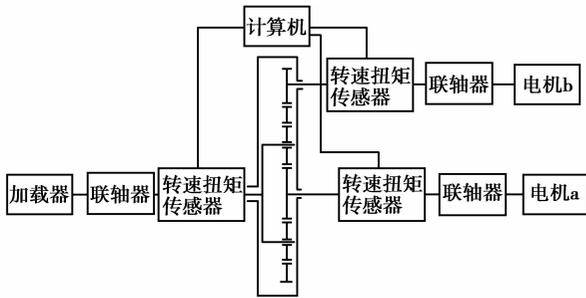
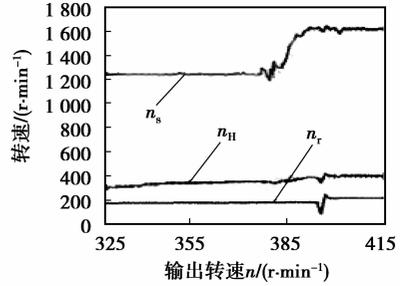


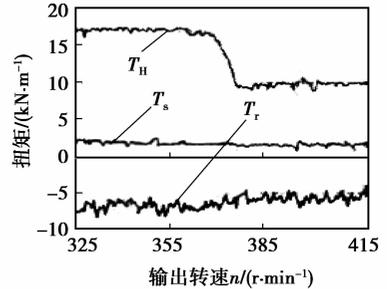
图 5 双驱动减速器转速、扭矩测试实验台

图 6 为在双输入同向转动条件下,当载荷由 17 N·m减少到 10 N·m时,系统内部转速、扭矩的变化关系。对比实验测得的系统内部转速、扭矩变化关系曲线(图 6)与理论计算的转速、扭矩变化关系曲线(图 7),可见其变化趋势基本一致,变化规律基本相同,表明建立的数学模型及提出的分析方法是正确的。

但是由于实验条件有限,简化类比实验采用的驱动电机功率较小;实验装置的制造、安装及润滑条件不好使系统的效率较低;实验工程中加载不均匀等多种因素导致试验曲线与理论曲线之间存在较大差异。

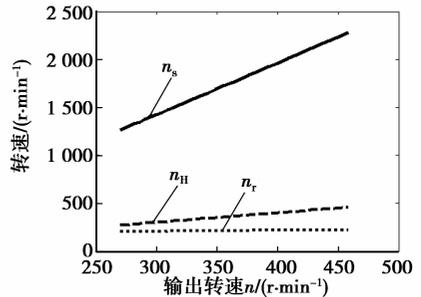


(a)系统内部转速关系

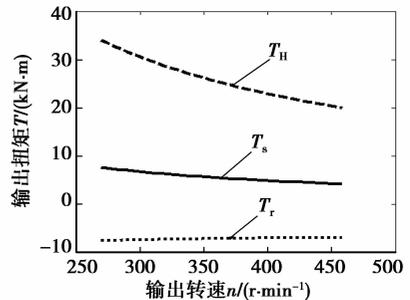


(b)系统内部扭矩关系

图 6 实测转速、扭矩关系曲线



(a)系统内部转速关系



(b)系统内部扭矩关系

T_s 、 T_r 、 T_H 分别为太阳轮、齿圈、行星架承受的扭矩

图 7 理论计算的转速、扭矩关系曲线

5 结 语

提出了用于盾构机的双驱动大功率行星传动系统,对其传动原理及结构进行了分析,根据该系统中减速器的结构简图,得到了该减速器的联系图,以此联系图为基础,建立了双驱动大功率行星齿轮传动系统的数学模型,得到了系统的传动比、系统内部转速、扭矩的关系及变化规律。研究了传动特性,得到了系统的传动特性图,清楚地反映了该双驱动系统分流和汇流的变化规律和传动特性。对比简化实验结果与理论计算结果,其变化趋势基本一致,变化规律基本相同,表明建立的数学模型及所用的分析方法是正确的。双驱动大功率行星传动系统结构简单、体积小,可有效解决不同步问题,同时用一套该系统可实现3种不同型式的盾构机传动系统的功能,为自主研究与开发新型的盾构机双驱动大功率行星传动系统奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] HUO J Z, SUN W, CHEN J, et al. Optimal disc cutter plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine(tbm)based on a multi-objective genetic algorithm [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2010,24(2): 521-528.
- [2] GONG Q M, ZHAO J. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009,46(1):8-18.
- [3] BENARDOS A. Artificial intelligence in underground development: a study of TBM performance[J]. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2008, 102: 21-32.
- [4] ZHANG Z Q, WU Q M, LI Y, et al. Research on technology of variant design for main frame of tunnel boring machine based on KBE[C]// First International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, November 1-3, 2008, Wuhan, Washington, DC, USA; IEEE Computer Society, 2008:429-432.
- [5] WU Q M, ZHANG Z Q. KBE based intelligent design system for TBM main frame [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006,17(4):331-333.
- [6] 崔国华,王国强,何恩光,等. 盾构机的研究现状及发展前景[J]. *矿山机械*, 2006,34(6):24-27.
- CUI GUO-HUA, WANG GUO-QIANG, HE EN-GUANG, et al. Status and Prospects of tunneling boring machine[J]. *Mining Machinery*, 2006, 34(6): 24-27.
- [7] ZHAO J, GONG Q M, EISENSTEN Z. Tunneling through a frequently changing and mixed ground; a case history in Singapore[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2007,22(4):388-400.
- [8] AOKI K, YAMAMOTO T, SHIRASAGI S. Geostatistical evaluation of the mechanical properties of rock mass for TBM tunneling by seismic reflection method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007,40(6):591-602.
- [9] GONG Q M, ZHAO J, JIANG Y S. In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007,22(3):303-316.
- [10] AL-SHYAB A, ALWIDYAN K, JAWARNEH A, et al. Non-linear dynamic behavior of compound planetary gear trains: model formulation and semi-analytical solution [J]. *Journal of Multi-body Dynamics*, 2009, 223(3):199-210.
- [11] ZHU L L, WANG G X. Optimization design and parametric modelling of gear reducer[C/OL]// 2009 2nd International Conference on Information and Computing Science, May 21-22, 2009, Manchester, England, UK. Washington, DC, USA; IEEE Computer Society, 2009:125-127.
- [12] HSIEH W H. Kinematic synthesis of cam-controlled planetary gear trains [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2009,44(5):873-895.
- [13] 武文辉,冯朝阳,陶定新. 一种用于土压平衡盾构机的大功率三级行星减速器:中国,200810231114. 1[P]. 2009-4-22.
- [14] 饶振纲. 行星齿轮传动设计[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [15] 林超,李润方,谢永春,等. 双驱动卷扬机多流传动系统的动态分析及实验研究[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(12):66-69.
- LIN CHAO, LI RUN-FANG, XIE YONG-CHUN, et al. Research on the dynamic analysis and test for multi-flow transmission system of double drive [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(12):66-69.

(编辑 张 革)