第 33 卷　第 3 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 33　No. 3
2020 年 9 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　　Sep. 2020

高磨蚀复合地层盾构刀盘受力分析与计算

薛晓龙，　马怀祥

(石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄　050043)

摘要:盾构在复合地层中施工,经常会遇到盾构姿态难以控制、刀盘刀具异常或过量磨损、刀盘变形与开裂等问题,目前是盾构施工一大难题。针对芜湖过江隧道其中一段软硬复合地层的工程地质特点,将其在盾构掘进断面内的地层简化为上软下硬的二元地层结构,对刀盘受力公式进行推导并建立刀盘受力计算模型,基于 LabVIEW 编制盾构刀盘受力计算程序。该程序可以计算盾构机在复合地层掘进过程中的刀盘有效推力、有效扭矩、倾覆力矩和不平衡力及它们的变化情况。最后实例计算,得出刀盘受力和力矩随软岩比、刀盘转角和贯入度的变化规律,解释了盾构在复合地层施工难题的原因,为其提供依据。

关键词:盾构机;盾构刀盘;LabVIEW;复合地层;盘形滚刀

中图分类号: U455.3+1　文献标志码: A　文章编号: 2095-0373(2020)03-0021-08

0　引言

盾构机是机、电、液、传感、信息等技术合一的产物[1],是量身定做的工程机械,其中要考虑水文地质、工程地质、地下管线、地下建筑及地面建筑物等因素[2]。我国地下空间利用进度加快,盾构又是当前主流的地下空间施工方法,我国已经广泛应用盾构技术进行施工[3]。但是,盾构在典型的软硬复合地层掘进时,常常会在施工的过程中遇到较大的困难,如盾构姿态难以控制、刀盘刀具异常或过量磨损、刀盘变形与开裂等[4]。而造成这些困难的主要因素是盾构掘进中刀盘的倾覆力矩和不平衡力。为此,针对芜湖过江隧道复合地层进行盾构刀盘的受力计算分析,建立了盾构机刀盘在复合地层掘进过程中的刀盘受力计算方法和基于 LabVIEW 编制了计算程序,从而为盾构在复合地层中掘进施工优化掘进参数提供了理论依据。

1　复合地层中刀盘受力分析

1.1　盾构掘进断面底层结构分析

芜湖过江隧道为双洞,长度为 3 950 m,其中包括长度为 690 m 的全断面岩层,长度为 1 000 m 的复合地层,长度为 2 260 m 的全断面土层[5],如图 1 所示。

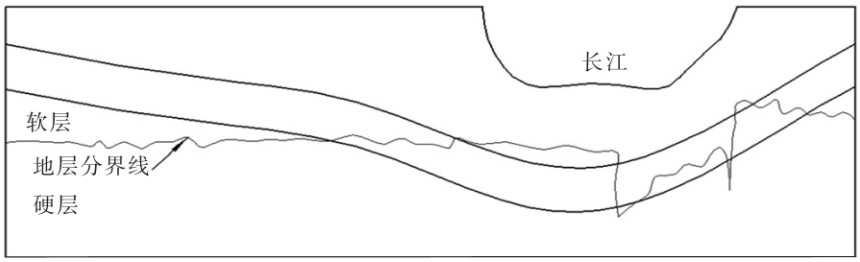


图 1　芜湖过江隧道地层分布简图

收稿日期:2018-09-27　　责任编辑:车轩玉　　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180153
基金项目:河北省研究生创新资助项目(CXZZSS2018067)
作者简介:薛晓龙(1990—),男,硕士研究生,研究方向为工程机械。E-mail:1550875608@qq.com
薛晓龙,马怀祥.高磨蚀复合地层盾构刀盘受力分析与计算[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):21-28.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2种或2种以上且工程地质、水文地质和岩土力学等特征相差悬殊的地层组成地层为复合地层[2]。由图1可以看出隧道复合地层由2种地层构成,分为上下2层,上层为土层、下层为岩层,是典型的上软下硬的复合地层结构。可以将其简化为二元地层结构,由2种不同参数的岩土构成。

以掘进平面为 XOY 平面建立固定坐标系,从掌子面向刀盘看,X 轴为垂直方向,向下为正,Y 轴为水平方向,向右为正,盾构掘进方向为 Z 轴,正向为掘进方向,这样建立的坐标系符合右手法则。刀盘旋转方向逆时针时为正,如图2所示。

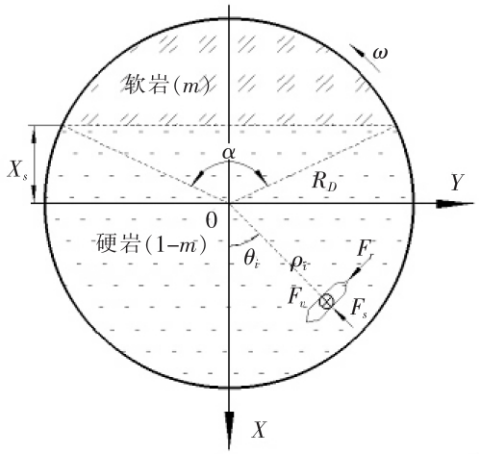


图2 盾构掘进断面内地层的二元地层结构简化模型

以掌子面为有效区域,二元地层结构中软层的面积与整个有效区域面积比为 m,m 将决定二元地层的结构。可以根据 m 计算出软层弧段所对圆心角 α 如式(1)所示,软层与硬层的分界面的坐标值 X_s 可按式(2)计算。

$$m=\frac{R_D^2(\alpha-\sin\alpha)/2}{\pi R_D{}^2}=\frac{\alpha-\sin\alpha}{2\pi} \tag{1}$$

$$X_s=-R_D\cos\frac{\alpha}{2} \tag{2}$$

1.2 盘形滚刀受力分析

在盾构掘进过程中滚刀可以简化为三向力模型,即受到切向滚动力 F_r、法向破岩力 F_v 和侧向力 F_s 3个力作用,如图3所示。现在,盘形滚刀受力模型比较多[6-11],常见的有 Roxborough 公式[9]、Evans 公式[9]、上海交通大学公式[11]、东北工学院公式[9]、科罗拉多矿业学院公式[9]、Rostami 公式[8]等。这些计算公式中,Rostami 公式比较全面地考虑了所有因素,采用常截面滚刀,广泛应用在很多的工程实践中。

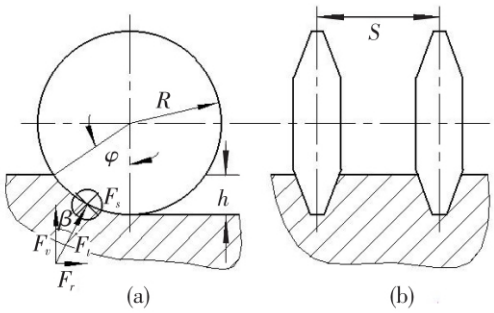


图3 盘形滚刀受力计算模型

本文采用 Rostami 公式,盘形滚刀受到的合力 F_t 由式(3)计算,法向破岩力 F_v 如式(4)所示,滚动切向力 F_r 由式(5)计算,侧向力 F_s 采用张照煌推导的侧向力公式[9],由式(6)计算。根据几何关系,滚刀破岩角 φ 可由式(7)计算,滚刀受到的合力与法向破岩力夹角 β 由式(8)计算。

$$F_t=\frac{cRT\varphi}{\psi+1}\sqrt[3]{\frac{S}{\varphi\ \sqrt{RT}}\sigma_c^2\sigma_t} \tag{3}$$

$$F_v=F_t\cos\beta \tag{4}$$

$$F_r=F_t\sin\beta \tag{5}$$

$$F_s=0.5\tau_s(R\varphi)^2\sin\frac{R\varphi}{2\rho} \tag{6}$$

$$\varphi=\arccos\left(1-\frac{h}{R}\right) \tag{7}$$

$$\beta=0.5\varphi \tag{8}$$

式中,c 为无量纲系数取2.12;R 为盘形滚刀半径;T 为盘形滚刀刃宽;S 为刀间距;φ 为岩石破碎角;ψ 为刀尖压力分布系数,一般取$-0.2\sim0.2$;σ_c 为岩石单轴抗压强度;σ_t 为岩石单轴抗拉强度;β 为滚刀合力与

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

滚刀垂直中心夹角;ρ 为滚刀安装半径;h 为贯入度。

1.3　刀盘受力分析

在盾构机掘进过程中刀盘并不与掌子面直接接触,而是滚刀对岩石进行切削,所以刀盘所受到的力是所有滚刀对它的合力。可以将刀盘受到的力分解为 F_x、F_y、F_z,F_u 为 F_x 和 F_y 合力,扭矩分解为 M_x、M_y、M_z,M_u 为 M_x 和 M_y 合力。F_x、F_y 为沿 X 轴和 Y 轴的不平衡力;M_x、M_y 为绕 X 轴和 Y 轴的倾覆力矩;F_z 为沿 Z 轴的推力,所有滚刀法向破岩力的合力,即有效推力;M_z 为绕 Z 轴的扭矩。

盘形滚刀破岩试验[10]表明盘形滚刀侧向力 F_s 比法向破岩力 F_v 和滚动力 F_r 小得多,不在一个数量级,而且其相交于刀盘中心,并不会产生倾覆力矩,故只在刀盘受力方面有影响,而力与滚刀的安装半径没有关系,力不会因为安装半径大而变大,故不把侧向力 F_s 计算入内。

当安装半径较大时,很小的力就会引起较大的力矩变化,所以要考虑边滚刀的贯入度变化。从前面的滚刀受力分析可以看出,法向力 F_v 和滚动切向力 F_r 与贯入度 h 有关系,而贯入度 h 与滚刀安装位置有关系,如图 4 所示。中心滚刀和正滚刀的的安装倾角为 0,所以其贯入度为盾构贯入度即为 h,而边滚刀由于安装倾角不为 0,所以其贯入度不为盾构贯入度,而为 $h\cos\beta_i$,即式(9)可以表示第 i 把滚刀的贯入度 h_i。

$$h_i = h\cos\beta_i \tag{9}$$

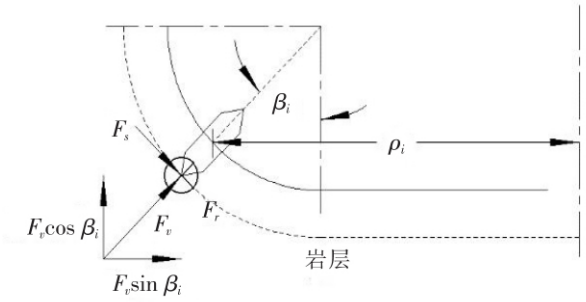


图 4　盾构刀盘上盘形滚刀法向破岩力分解示意图

在刀盘坐标系 OXY 中,第 i 把滚刀的安装极角为 θ_i,安装半径为 ρ_i,如图 4 所示。每把滚刀所受到的力沿盾构刀盘轴线的分力叠加组成刀盘推力 F_z,沿 X 轴方向分力叠加组成不平衡力 F_x,沿 Y 轴方向分力叠加组成不平衡力 F_y;每把滚刀的滚动力产生的阻力矩叠加组成刀盘扭矩 M_z,每把滚刀受到的力绕 X 轴产生的弯矩叠加组成不平衡力矩 M_x,绕 Y 轴产生的弯矩叠加组成不平衡力矩 M_y。刀盘角速度用 ω 表示,时间用 t 表示,刀具总数用 n 表示,刀盘的受力公式

$$F_x = \sum_{i=1}^{n}(F_{ri}\sin(\theta_i+\omega t) - F_{vi}\sin\beta_i\cos(\theta_i+\omega t)) \tag{10}$$

$$F_y = \sum_{i=1}^{n}(-F_{ri}\cos(\theta_i+\omega t) - F_{vi}\sin\beta_i\sin(\theta_i+\omega t)) \tag{11}$$

$$F_z = \sum_{i=1}^{n}(-F_{vi}\cos\beta_i) \tag{12}$$

$$M_x = \sum_{i=1}^{n} -F_{vi}\cos\beta_i(R\sin\beta_i+\rho_i)\sin(\theta_i+\omega t) \tag{13}$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{n} F_{vi}\cos\beta_i(R\sin\beta_i+\rho_i)\cos(\theta_i+\omega t) \tag{14}$$

$$M_z = \sum_{i=1}^{n} -F_{ri}(R\sin\beta_i+\rho_i) \tag{15}$$

$$F_u = \sqrt{F_x^2+F_y^2} \tag{16}$$

$$M_u = \sqrt{M_x^2+M_y^2} \tag{17}$$

2　基于 LabVIEW 编制刀盘受力程序

2.1　刀盘受力程序编制思路

当盾构在掘进的过程中,滚刀在做螺旋运动,在软硬地层中持续交替变化,用 X_i 表示第 i 把滚刀在坐标系 OXY 中的横坐标。当 X_i 小于 X_s 时,滚刀位于软岩中,按照软岩参数计算受力,当 X_i 大于等于 X_s 时,滚刀位于硬岩中,按照硬岩参数计算受力。X_i 的计算公式如式(18)。为此采用 LabVIEW 编制程序来计算刀盘旋转一周的受力情况,计算程序流程如图 5。

$$X_i = (R\sin\beta_i + \rho_i)\cos(\theta_i+\omega t) \tag{18}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

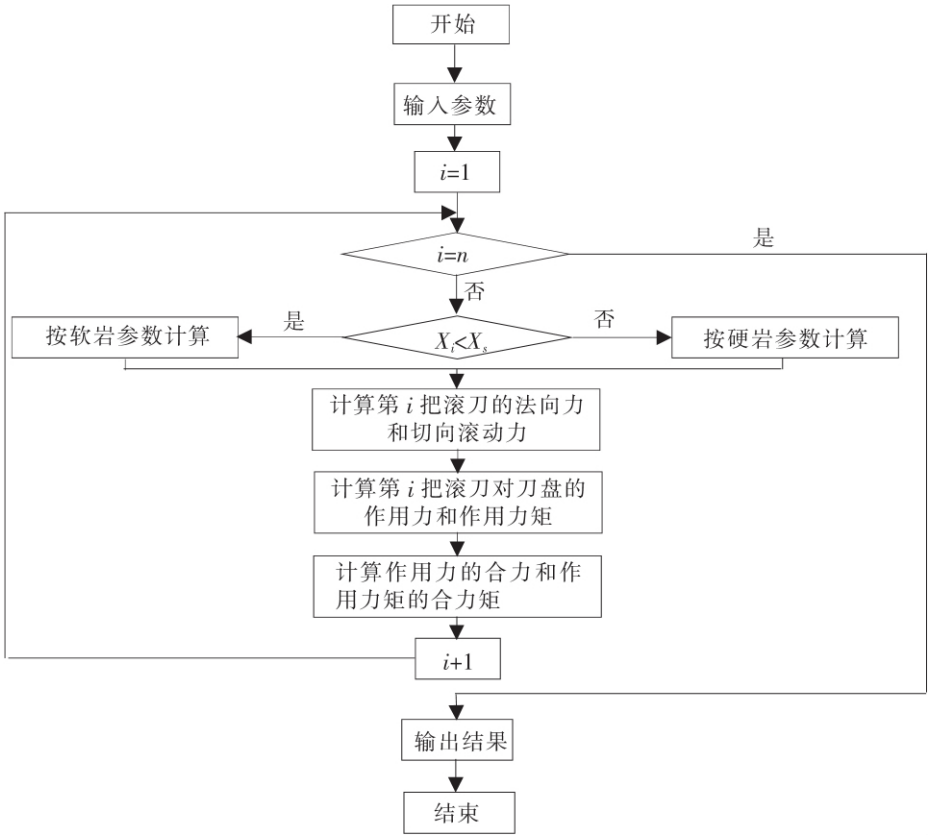


图5 计算程序流程图

2.2 计算程序的输入参数

为了使计算程序具有更广的适应性,将岩石参数、相关系数、刀盘参数、刀具参数、掘进参数、安装参数和软岩比全部设置为输入参数,这样可以使计算程序适应所有的滚刀刀盘,适用性更强,具有一定的通用性。表1为需要的具体计算参数。

表1 输入参数

类型	参数名称	单位	类型	参数名称	单位
岩石参数	硬岩单轴抗压强度	MPa	刀具参数	刀半径	mm
	硬岩单轴抗拉强度	MPa		刀刃宽	mm
	软岩单轴抗压强度	MPa	掘进参数	贯入度	mm/r
	软岩单轴抗拉强度	MPa		角速度	rad/s
相关系数	无量纲系数		安装参数	刀间距	mm
	刀尖压力分布系数			安装倾角	(°)
刀盘参数	刀具总数	把		安装极角	(°)
	刀盘半径	mm		安装半径	mm
软岩比	软岩比				

3 计算与分析

3.1 地层概况

芜湖过江隧道ZK4+200～ZK5+300(YK4+165～YK5+255)段是上软下硬的复合地层,洞身围岩为强～中风化粉砂岩、石英砂岩、泥质粉砂岩互层,岩石抗压强度存在较大差异。石英砂岩为较硬岩,局部为坚硬岩,岩石石英含量高达80%,试验最大天然抗压强度为113.4 MPa[5]。表2为地层物理参数。

表2 地层物理参数取值 MPa

地层	单轴抗压强度	单轴抗拉强度
硬岩	113.4	15
软岩	2.14	0.63

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2　盾构刀盘刀具配置

采用某型号盾构刀盘进行计算仿真,盾构刀盘为面板式有 49 把滚刀和 6 把铲刀,其中包括 8 把中心滚刀、29 把正面滚刀和 12 把边缘滚刀,中心滚刀为 17 英寸滚刀,其余为 19 英寸滚刀。图 6 为滚刀轨迹图。

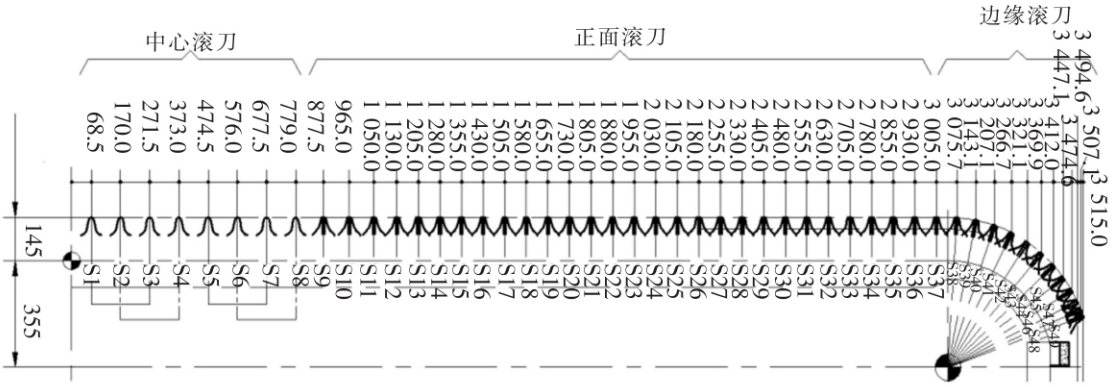
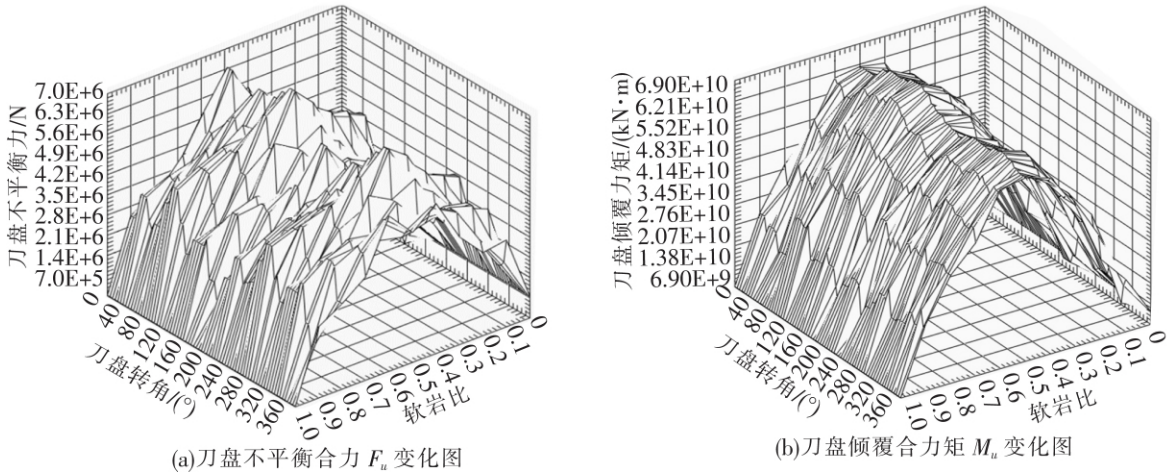


图 6　滚刀轨迹图(单位:mm)

3.3　刀盘受力分析

在掘进断面内不同复合地层软岩比的情况下,盾构以刀盘转速 n 为 1.2 r/min 和贯入度 h 为 5 mm/r 进行掘进时,利用计算程序计算盾构机在上软下硬典型复合地层中掘进时的不平衡合力和倾覆合力矩,绘制不平衡合力 F_u 及倾覆合力矩 M_u 随旋转角度和复合地层软岩比变化的三维曲线图,如图 7。



(a)刀盘不平衡合力 F_u 变化图　　(b)刀盘倾覆合力矩 M_u 变化图

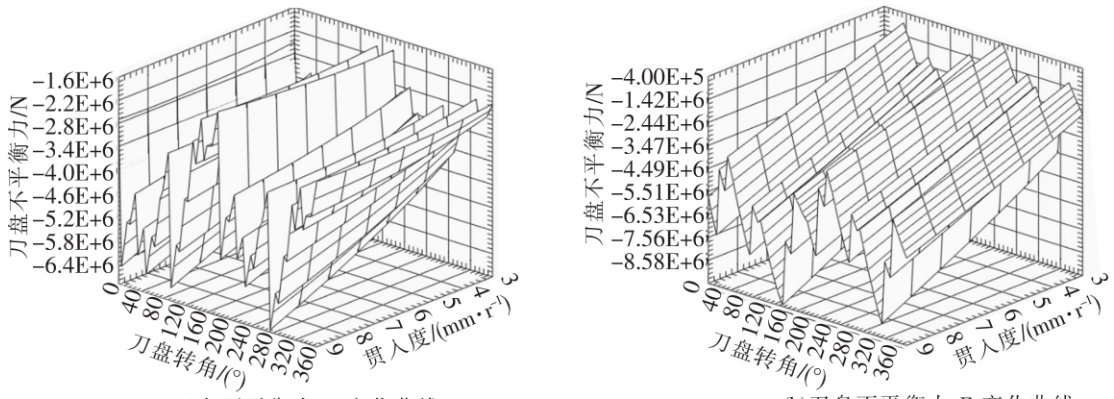
图 7　刀盘不平衡合力 F_u 和刀盘倾覆合力矩 M_u 变化曲线图(h=5 mm/r,r=0～1)

由图 7 可以看出在软岩比为 0 和 1 时,即硬岩和软岩的均质地层中,刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 为定值,在硬岩中刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 较大;在软岩比不为 0 时,即在复合地层时刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 随着刀盘转角变化呈双周期变化,在 135°时刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 达到最大值;刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 在软岩比 0～0.5 时与软岩比呈正比,在软岩比 0.5～1 时与软岩比呈反比,在软岩比为 0.5 时刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 值最大。

由于软岩比为 0.5 时,刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 的值最大,所以分析在软岩比为 0.5 时,盾构机的贯入度变化对刀盘不平衡力和倾覆力矩的影响。利用计算程序计算盾构机在软岩比为 0.5 时的上软下硬的复合地层掘进时不平衡合力和倾覆合力矩,绘制不平衡力及倾覆力矩随旋转角度和贯入度变化的三维曲线图。

由图 8 可以看出,刀盘不平衡力 F_x 和 F_y 与贯入度成正比。但是不平衡力 F_x 的最小值基本不变,最大值基本呈线性增大,在刀盘旋转一圈内呈双周期变化,F_x 共发生 4 次突变;不平衡力 F_y 基本呈线性增大,最大值和最小值的变化比例基本相同,在刀盘旋转一圈内呈双周期变化。

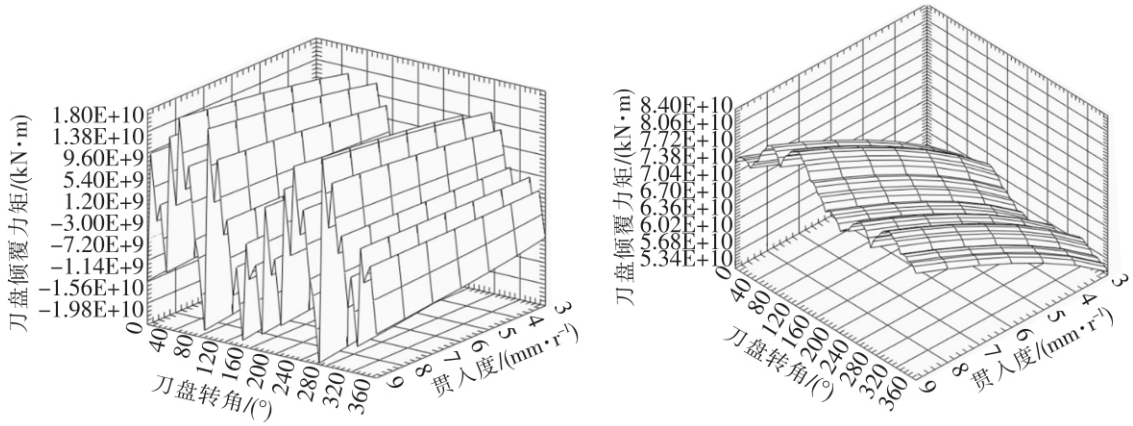
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)刀盘不平衡力 F_x 变化曲线 (b)刀盘不平衡力 F_y 变化曲线

图 8 刀盘不平衡力 F_x 和刀盘不平衡力 F_y 变化曲线($r=0.5$,$h=3\sim9$ mm/r)

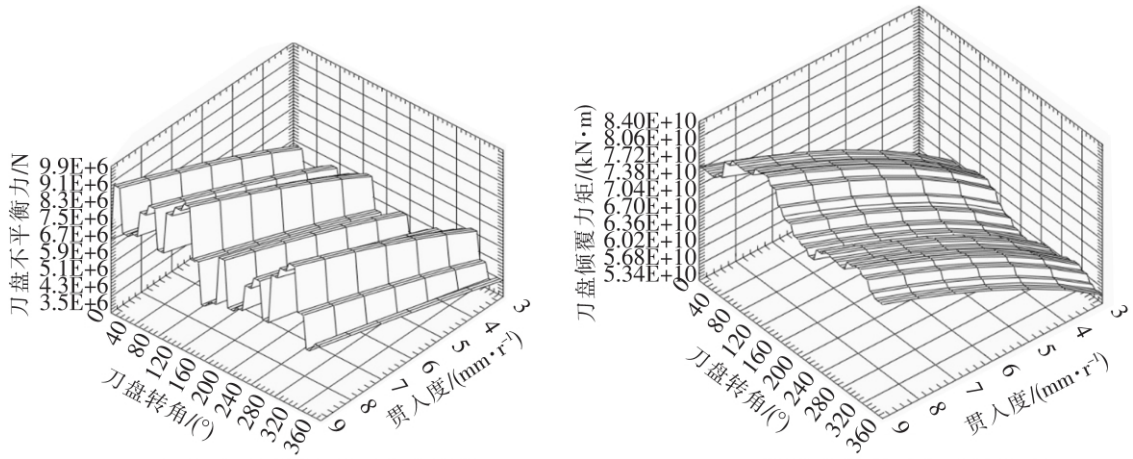
由图 9 可以看出,刀盘倾覆力矩 M_x 和 M_y 随着贯入度的增加基本呈线性增加,在刀盘旋转一圈内呈双周期变化,刀盘倾覆力矩 M_x 的方向发生周期性变化且有 4 次突变,而 M_y 只是数值大小发生变化方向并不发生变化。



(a)刀盘倾覆力矩 M_x 变化 (b)刀盘倾覆力矩 M_y 变化

图 9 刀盘倾覆力矩 M_x 和刀盘倾覆力矩 M_y 变化曲线($r=0.5$,$h=3\sim9$ mm/r)

由图 10 可以看出,刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 随着贯入度增加基本呈线性增加,也呈双周期变化,贯入度变化对刀盘不平衡合力 F_u 和倾覆合力矩 M_u 影响较大。



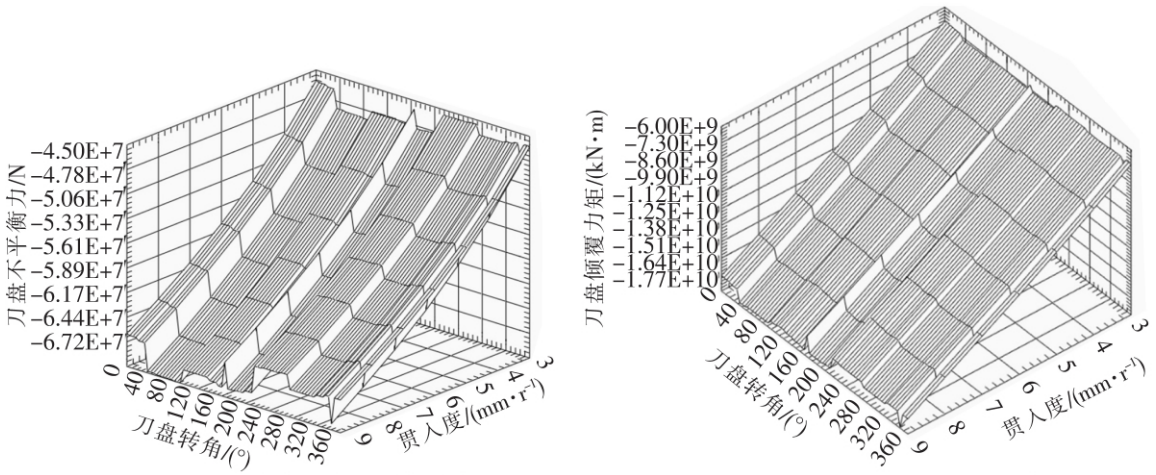
(a)刀盘不平衡合力 F_u 变化曲线 (b)刀盘倾覆合力矩 M_u 变化曲

图 10 刀盘不平衡合力 F_u 和刀盘倾覆合力矩 M_u 变化曲线($r=0.5$,$h=3\sim9$ mm/r)

由图 11 可以看出,推进力 F_z 和扭矩 M_z 也随着贯入度增加基本呈线性增加,贯入度变化对推进力

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

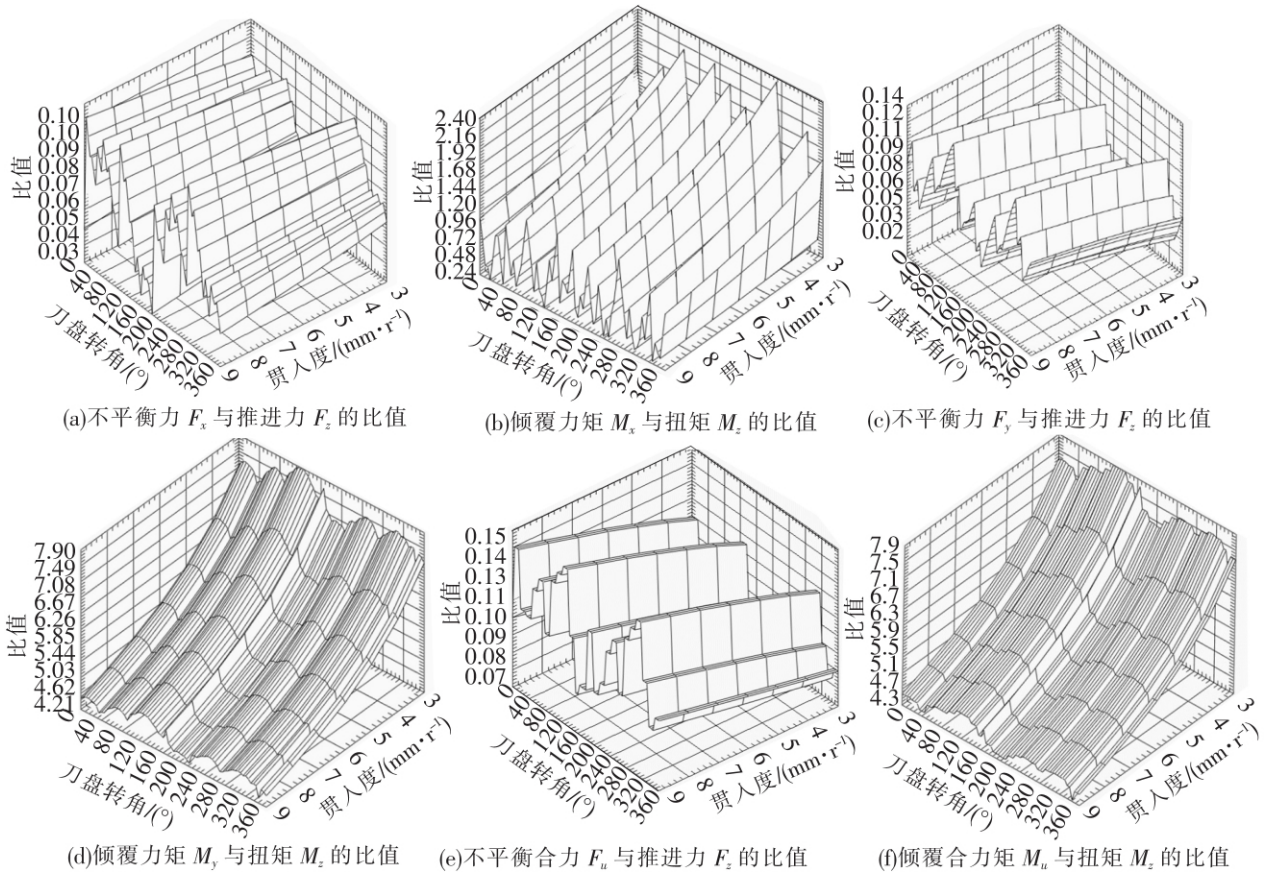
F_z 和扭矩 M_z 的影响较大,但是在刀盘旋转一周内变化幅度不大。



(a)刀盘推进力 F_z 变化曲线　　(b)刀盘扭矩 M_z 变化曲线

图 11　刀盘推进力 F_z 和刀盘扭矩 M_z 变化曲线($r=0.5$,$h=3\sim9$ mm/r)

对不平衡力与推进力和倾覆力矩与扭矩的比值进行分析,绘制不平衡力与推进力和倾覆力矩与扭矩的比值随刀盘转角和贯入度的变化曲线图,如图 12。



(a)不平衡力 F_x 与推进力 F_z 的比值　(b)倾覆力矩 M_x 与扭矩 M_z 的比值　(c)不平衡力 F_y 与推进力 F_z 的比值

(d)倾覆力矩 M_y 与扭矩 M_z 的比值　(e)不平衡合力 F_u 与推进力 F_z 的比值　(f)倾覆合力矩 M_u 与扭矩 M_z 的比值

图 12　刀盘不平衡力与推进力和倾覆力矩与扭矩的比值($r=0.5$,$h=3\sim9$ mm/r)

由图 12 可以看出,刀盘不平衡力与推进力的比值随着贯入度增加呈线性增加,增加比例较小,比值本身也比较小,贯入度变化对不平衡力与推进力比值的影响不大,贯入度为 9 时不平衡合力最大,为推进力的 15%。倾覆力矩与扭矩的比值随着贯入度的增加呈指数减小,变化比率随着贯入度增大而减小,贯入度的变化对倾覆力矩与扭矩的比值影响较大。倾覆合力矩 M_x 与扭矩 M_z 的比值相比倾覆合力矩 M_y 与扭矩 M_z 的比值较小,在贯入度为 9 时,倾覆力矩 M_x 为扭矩 M_z 的 0.96 倍,而倾覆力矩 M_y 为扭矩

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

M_z 的 4.21 倍,倾覆力矩 M_y 占刀盘倾覆力矩主要部分。

4 结语

当盾构机在复合地层掘进时,面临着周期性的不平衡力和倾覆力矩,使盾构刀盘的工作环境进一步恶化,4 次不平衡力和倾覆力矩突变会在盾构掘进过程中引起刀盘较大的振动,过大的倾覆力矩会引起刀盘的偏心姿态难以控制甚至还会引起卡机。盾构在该段实际施工过程中,出现的刀盘异常振动和刀具异常磨损也说明了这点。本文提出的盾构刀盘不平衡力和倾覆力矩在复合地层中的变化规律,可为日后盾构在复合地层中施工优化掘进参数提供参考和理论依据。

参 考 文 献

[1]陈馈. 盾构施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2009.

[2]竺维彬,鞠世健. 复合地层中的盾构施工技术[M]. 北京:中国科学技术出版社,2006.

[3]洪开荣,陈馈,冯欢欢. 中国盾构技术的创新与突破[J]. 隧道建设,2013,33(10):801-808.

[4]李婕,吴起星. 广州地区软硬复合地层盾构施工技术研究[J]. 广州建筑,2014,42(3): 26-32.

[5]中铁第四勘察设计院集团有限公司. 芜湖城南过江隧道工程地质勘察报告[R]. 武汉:中铁第四勘察设计院集团有限公司,2017.

[6]聂羽飞,郭京波,刘进志,等. 基于 LS-DYNA 的 19 英寸盘形滚刀仿真分析与优化[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(2):77-81.

[7]张厚美. 盾构隧道的理论研究与施工实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[8]Rostami J,Ozdemir L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs[C]. Boston:MA,1993:793-809.

[9]张照煌. 全断面岩石掘进机及其刀具破岩理论[M]. 北京:中国铁道出版社,2003.

[10]吴起星. 复合地层中盾构机滚刀破岩力学分析[D]. 广州:暨南大学,2011.

[11]孙鸿范,陈健元,陈刚. 掘进机盘形滚刀破岩力及计算载荷的研究[J]. 工程机械,1980(8):1-7.

Cutterhead Mechanics Analysis of Shield Machine in High Abrasion Complex Stratum

Xue Xiaolong, Ma Huaixiang

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Shield construction in composite strata often encounters such problems as difficult control of shield posture, abnormal or excessive wear of cutter head, deformation and cracking of cutter head, which is a major problem in shield construction. In view of the characteristics of the soft and hard complex strata of Wuhu area, the geological section of shield tunneling is simplified as the upper soft and lower hard binary stratum. The force formula of cutter head is deduced and the force calculation model of cutter head is established. Based on LabVIEW, the force calculation program of shield cutter head is compiled. By this new program, the values and changes of these mechanical parameters of cutter head can be obtained, which include effective thrust, effective torque, overturning moment and unbalanced force in shield tunneling in complex stratum. Taking the shield construction of Wuhu Yangtse River Crossing Tunnel for example, the cutter head mechanical state is calculated. Then the variation law of force and moment of cutter head with soft rock ratio, cutter head rotation angle and penetration degree are obtained, and the reasons for the difficulties in shield construction in composite stratum are explained, which provides a basis for it.

Key words: shield machine; cutterhead; LabVIEW; complex stratum; disc cutter

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net