

DOI: 10.3901/JME.2014.21.023

隧道掘进机刀群与盘体支撑筋耦合布置设计*

霍军周 孙 伟 欧阳湘宇 虞诗强 张 旭

(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 刀盘是全断面隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)的关键部件, TBM 刀盘系统设计直接关系掘进效率和可靠性。刀盘系统设计的关键是复杂岩石边界下刀群布置设计与刀盘盘体结构设计, 二者相互耦合, 相互影响。分析刀群与盘体支撑结构之间空间位置耦合以及支撑结构与刀盘强度刚度之间的非线性耦合关系, 建立刀群与盘体支撑结构耦合布置优化模型, 提出多子系统协同进化的刀具适应性布置与盘体结构耦合设计方法。以引洮工程为例进行验证, 结果表明: 支撑筋初始安装角与刀盘强度、刚度之间存在非线性函数关系, 多子系统协同进化方法求解出的刀群与支撑筋耦合布置方案的最大等效应力、最大变形量、不平衡力矩、不平衡力、顺次角度等指标相比原方案降低了 30% 以上, 以此证明提出的耦合优化模型及其求解方法的可行性和有效性, 可为 TBM 刀盘系统设计提供一定的借鉴与方法支撑。

关键词: 全断面隧道掘进机; 刀具布置; 刀盘盘体结构; 耦合; 协同进化

中图分类号: U455

Coupling Layout Design of Disc Cutters Group and Cutterhead Supporting Structure

HUO Junzhou SUN Wei OUYANG Xiangyu YU Shiqiang ZHANG Xu

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: Cutterhead is one of the key parts of full face tunneling boring machine(TBM) and the adaptive design of cutterhead topology structure of the TBM directly affects its boring efficiency and reliability. The key issue of the cutterhead topology design lies in the adaptive layout design of disc cutters group and the cutterhead structure design under the complex rock boundary conditions; they are mutual coupling and mutual influencing. It has been analyzed that the coupling relation between the disc cutters group and the cutterhead structure, and then the nonlinear coupling model between the cutterhead structure and the cutterhead strength and stiffness has been established. Finally the multi-objectives coupling layout design model between the disc cutters group and the cutterhead structure has been constructed and the corresponding multi-subsystem co-evolutionary solving method has been proposed. Taking the practical “Yintao” project as a background, the numerical simulation results have shown that: compared with the original design of cutterhead, the values of maximum stress, maximum deformation, unbalanced moment, unbalanced force, sequential angle and other indicators of the optimal layout design solved by the proposed method have reduced by 30% or more, which has proved the feasibility and efficiency of this method and its capability of providing technical support for engineers.

Key words: tunnel boring machine; disc cutter layout; cutterhead structure; coupling; co-evolutionary

0 前言

全断面隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)是一种用于隧道掘进的高端工程装备。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020)》强调

大力振兴装备制造业, TBM 作为重型极端服役装备影响国计民生^[1]。目前, 我国大型 TBM 的设计能力薄弱核心技术有较大空白。刀盘系统设计是 TBM 设计的关键技术, 设计不良易导致刀圈断裂、主轴承损坏和刀盘严重磨损等问题从而严重影响施工进度。

TBM 掘进过程中地质条件复杂围岩物理参数随机变化且差异极大, 刀盘系统受力性态变化剧烈。刀群布置、刀盘构型、出碴口位置及大小、支撑筋

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB035400)、国家自然科学基金(51375001)、辽宁省科技攻关(2011220031)和高等学校博士学科点专项科研基金(20110041110029)资助项目。20131029 收到初稿, 20140530 收到修改稿

位置等刀盘拓扑结构直接影响刀盘滚刀发热、磨损、切削效率和可靠性,而刀群布置与盘体结构的相互制约更增大了刀盘设计的难度。因此,如何在复杂围岩边界条件下进行刀群布置和刀盘盘体结构耦合设计是刀盘系统设计所必须解决的关键问题。

刀群布置包括刀间距设计和刀群平面布置,在刀间距设计研究方面,TEALE^[2]于 1965 年就提出了比能的概念,它表示切削单位体积岩石所需的能量。比能是评价刀间距优劣的重要依据,降低比能成为优化掘进过程的最低目标之一。此后各国研究人员研究了贯入量 P 、刀间距 S 以及它们的比值 S/P 对破岩效率的影响。张照煌等^[3]从破岩量的观点在理论上探讨了确定滚刀间距的原则:如果相邻滚刀在刀盘每转一周的切深相等,且破岩量也相同,则应保证刀盘转动多周以后不存在未连通的岩脊。GONG 等^[4]使用二维离散元数值仿真的手段对刀间距对破岩效率的影响进行了研究,发现当刀间距逐步增加时,岩碴的厚度和面积先增加(到最优值)而后降低,仿真结果与试验结果吻合。SNOWDON 等^[5]进行单刀 V 形滚刀切削试验发现:刀间距增大时碎片尺寸变大、比能降低直到最小值,如果刀间距继续增大,比能又开始升高。OZDEMIR 等^[6]也提出相同的结论。GERTSCH 等^[7]使用 Robbins 公司生产的 432 cm 等截面滚刀进行了红花岗岩的线性切割试验,研究了刀间距和贯入量对切削力、比能、切削系数和滚刀受力的影响规律。目前,大量试验研究和现场数据均表明:破碎坚韧的岩石,滚刀最优的 S/P 取值较低,而破碎硬脆的岩石,最优 S/P 取值则较高^[8]。霍军周等^[9]借助 RFPA2D 仿真平台建立了多滚刀顺次作用于岩石的仿真模型,通过仿真试验获得了刀间距和顺次角度的最佳值。谭青等^[10]采用离散元颗粒流方法建立滚刀破岩的平面仿真模型,分析不同贯入量下比能与刀间距的关系,同时还对贯入度与岩体裂纹的关系进行了探究。

在刀盘平面布置设计方面,王家骥^[11]对现有的刀群平面布置方案进行了归纳研究,总结了常见的单螺旋线型与双螺旋型的这两种滚刀平面布置形式。纪昌明等^[12-13]提出了 TBM 破岩过程的受力平衡理论,建立了基于刀盘受力平衡的盘刀布置数学模型,旨在提供一种刀盘受倾覆力矩和侧向力趋近于零的刀群布置方案。HUO 等^[14-15]建立了多螺旋线型、星型和随机型三种滚刀布局方法的数学模型,采用遗传算法和协同演化算法求解出三种布置方式的优化布置方案,并对三种方案的性能的优缺点各自进行了对比。蒲毅等^[16]基于阿基米德螺旋线布置方法,计算刀具磨损等寿命原则下的主切削刀布

置曲线;建立土压盾构刀盘先行刀的立体布局方法,并结合具体工程实例验证了该方法的合理性。

刀盘直接与围岩作用,盘体结构的刚度、强度对 TBM 掘进施工进度影响很大。盘体结构设计主要包括盘体剖分形式设计、出渣槽布置、支撑筋布置、人孔布置以及刀盘主结构参数设计等方面内容^[17]。国际上主要的 TBM 生产厂家设计的刀盘样式各具风格,各个厂家由于自身积累的经验和设计理念的不同,其设计结果也是不尽相同。目前,由于技术保密等原因,关于刀盘盘体结构设计的相关研究鲜见报道。盘体剖分形式主要考虑制造、运输和装配的工艺性要求。一般随着刀盘直径的增大,刀盘多采用分体结构,分块加工制造和运输,并在现场组对焊接^[18]。

综上所述,目前国内外学者在刀间距设计、刀群平面布置设计方面进行了深入的研究也取得了一定的成果,但是对复杂工况下刀群布置与刀盘盘体结构耦合等问题的研究尚不够深入。欧美等先进发达国家已经做过深入研究,但由于技术保密等原因在公开资料中鲜有相关文献,因此很需要自主研究。正因为如此本文将研究刀群布置与盘体结构的耦合模型、探索相应的耦合设计方法,为实现随机突变工况下刀盘系统设计提供理论方法与技术支撑。

1 总体研究思路

基于以上分析,本文将探讨刀群布置和盘体结构耦合设计方法。本文的总体研究思路如图 1 所示:分析刀群与支撑结构耦合关系以及支撑结构与盘体刚度、强度的映射关系,以滚刀位置极角与支撑筋初始位置角为优化变量,以刀盘受载情况、应力和应变作为优化目标,建立刀群布置与刀盘盘体结构耦合设计的优化模型,研究多子系统协同进化算法

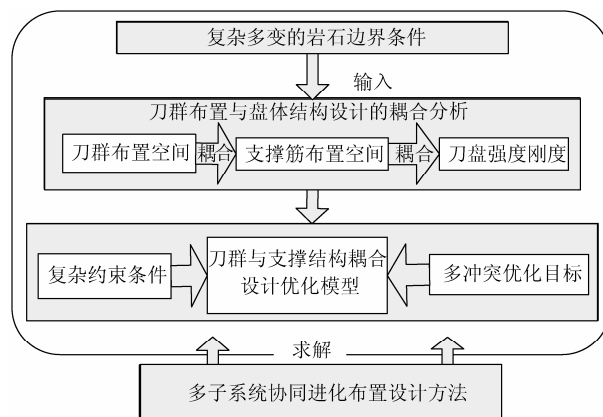


图 1 总体研究思路

进行求解。从而提出 TBM 刀群与盘体出碴-支撑结构耦合布置的方法。

2 刀群布置与盘体结构耦合关系

出碴槽的结构和位置确定后,在刀盘盘面布置滚刀时往往只是考虑减小刀盘所受到的不平衡力矩,但是显然安装滚刀的位置不仅使刀盘的刚度、强度降低,而且该处也不能再布置支撑筋等部件。可见二者在空间上是相互影响、相互干涉的,因此在进行刀盘设计时需要分析刀群布置与盘体结构设计的耦合关系。

此外,支撑筋位置和刀盘强度、刚度也存在耦合关系。一般说来,各个支撑筋间隔角度相同,故而当支撑筋数量确定以后,其初始角的范围便确定了,如支撑筋数量为 6 时,初始角的范围即为 $(0^\circ, 60^\circ]$,如图 2 所示。

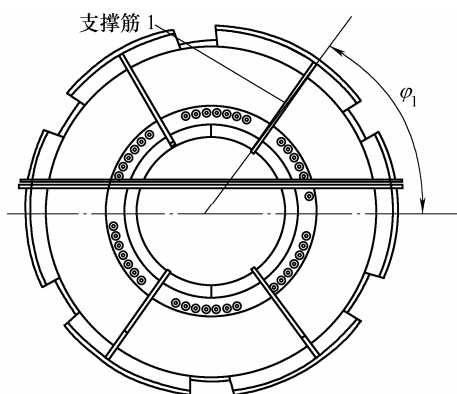


图 2 支撑筋初始位置角示意图

因此在建立耦合优化模型时还要得到支撑筋位置初始角 φ_1 与刀盘所受的最大等效应力 σ_{\max} 、刀盘的最大变形量 δ_{\max} 的函数关系。这里为了便于得到充分的样本进行拟合该函数关系,采用参数化建模的方法。以初始角作为变量,研究刀盘的最大变形量与最大主应力并拟合相应曲线。经过有限元计算,得到的结果如图 3 和图 4 所示。最大变形位置和最大主应力点位置如图 5、6 所示。

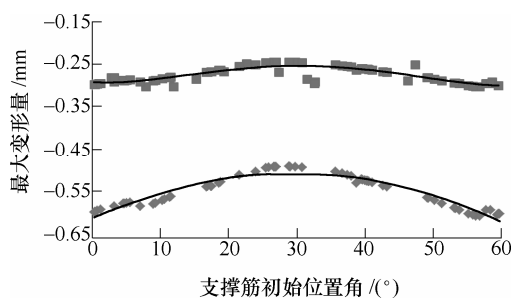


图 3 刀盘最大变形量随支撑筋初始角的变化曲线

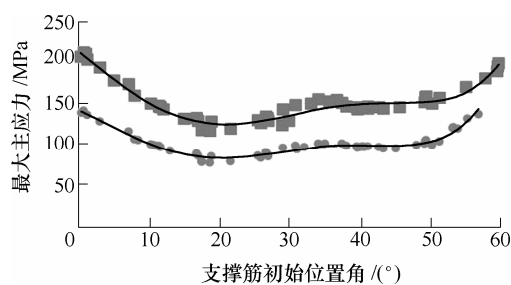


图 4 刀盘最大主应力随支撑筋初始角的变化曲线

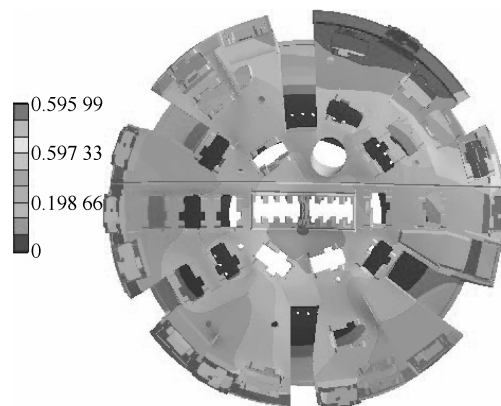


图 5 刀盘最大变形量/mm

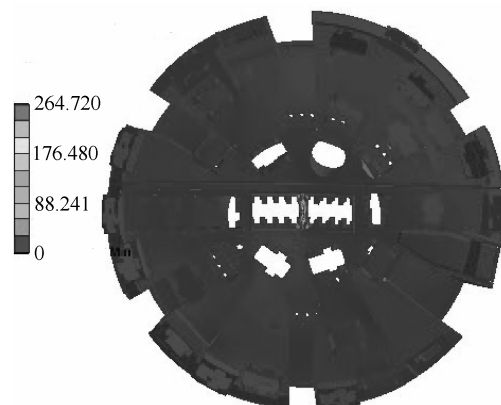


图 6 刀盘最大应力/MPa

采用多项式拟合出的支撑筋初始角和刀盘最大等效应力 σ_{\max} 和最大变形量 δ_{\max} 的函数关系分别为

$$f_{\sigma}(x) = 5 \times 10^{-6} x^5 - 6 \times 10^{-4} x^4 + 2.58 \times 10^{-2} x^3 - 0.291 x^2 - 3.153 2 x + 141.22 \quad (1)$$

$$f_{\delta}(x) = -2 \times 10^{-4} x^2 + 1.03 \times 10^{-2} x - 0.915 2 \quad (2)$$

前者的拟合相关系数为 0.955 7, 后者的拟合相关系数为 0.900 9。由图 3~6 及式(1)、式(2)可知,刀盘支撑筋与刀盘强度、刚度之间存在明显的非线性函数映射关系。

3 刀群与支撑结构耦合设计优化模型

首先建立滚刀布置的数学描述,本文假设采用米字型布置,如图 7 所示。图 7 中白色圆盘部分为

刀盘盘面上布置正滚刀的米字型区域,灰色区域为刀盘上布置边滚刀的过渡区域,箭头则表示可供设计变量搜索的分支方向。假设任意正滚刀均有 q 条可行分支,而灰色区域的边滚刀的可行分支数量增加1倍,即 $2q$ 条,记为分支1,分支2, ..., 分支 q , ..., 分支 $2q$, 构成可行分支搜索集合 $E_i = \{1, 2, \dots, q, \dots, 2q\}$ 。当所有的滚刀布置分支确定之后,则形成一条分支连接路径。设 $\theta_i(t) \in \mathbf{R}$ 为第 i 把滚刀在 t 时刻的位置角, 则 $i+1$ 时刻的位置角可以表示为^[14]

$$\theta_i(t+1) \in \begin{cases} \{\theta | \theta = \theta_i(t) + \frac{2j\pi}{q}, j=1, \dots, q\} \\ \rho_i \in \text{米字型区域} \\ \{\theta | \theta = \theta_i(t) + \frac{k\pi}{q}, k=1, \dots, 2q\} \\ \rho_i \in \text{过渡区域} \end{cases}$$

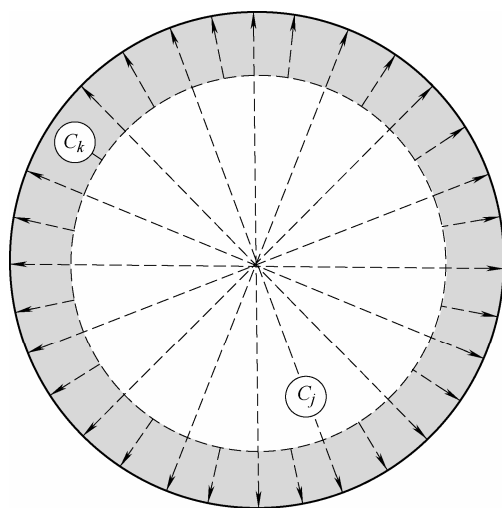


图7 滚刀布置的数学描述

以刀盘载荷、刀盘最大变形量和最大等效应力的最小化为优化目标,以刀群安装位置极角与支撑筋初始位置角为设计变量,建立刀群布置和盘体结构的耦合优化模型。TBM掘进时与刀群相互作用的岩体动态边界记作 $U^I = \{R_1, \dots, R_q\}$; 滚刀集合记作 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 其中 n 为刀盘上布置的刀具数量; 刀盘支撑筋集合记作 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$, 其中 m 为支撑筋数量。

滚刀按分布位置可以分为两种——边滚刀和侧滚刀,如图8所示。在对滚刀布置规则数学模型化的过程中,以刀盘圆心为原点建立坐标系,选取滚刀质心相对于刀盘圆心的极径 ρ_i 和极角 θ_i 来表示某滚刀 C_i 位置,其中 $\rho_i \in (0, R]$, $\theta_i \in [0, 2\pi)$ 。由于边滚刀的存在,还需要考虑边滚刀相对于垂直方向的夹角 γ_i (图8), $\gamma_i \in [0, \pi/2)$ 。综上所述,第 i

把滚刀 C_i 的位置时可以由 $C_i(\rho_i, \theta_i)$ 来表示,因此滚刀布置数学模型可以表示为

$$X_{\rho_i, \theta_i} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad x_i = \{\rho_i, \theta_i\} \quad i=1, 2, \dots, n$$

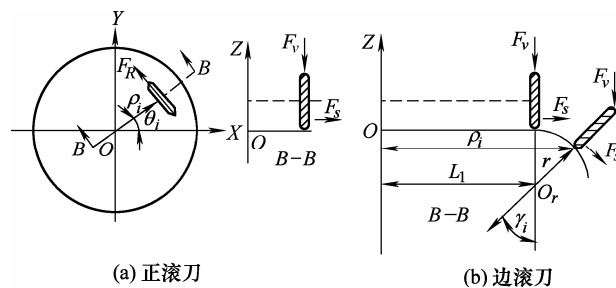


图8 滚刀受力分析与安装几何尺寸

在支撑筋位置的数学模型表达中,以支撑筋相对于 x 轴的夹角 φ_j 表示某支撑筋 L_j 的布置位置,记作 $L_j(\varphi_j)$ 。综上所述,滚刀及支撑筋布置规则的数学模型可以表示为

$$X_{\theta_i, \varphi_j} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$$

则刀群布置与刀盘盘体结构设计的总体优化模型如下

$$\begin{aligned} \min_{X \in D} y = & f(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I) = (f_1(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I), \\ & f_2(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I), f_3(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I), \\ & f_4(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I), f_5(X_{\theta_i, \varphi_j}, U^I)) \end{aligned}$$

s.t.

不干涉要求

$$\begin{aligned} g_1(X_{\theta, \varphi}, U^I) &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \Delta V_{ij} \leq 0 \\ g_1(X_{\theta, \varphi}, U^I) &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \Delta V_{ij} \leq 0 \end{aligned}$$

刀间距要求

$$g_2(X_{\theta, \varphi}, U^I) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (S_{ij} - 2h \tan \beta) \leq 0$$

相邻滚刀顺次破岩要求

$$g_3(X_{\theta, \varphi}, U^I) = \sum_{i=0}^{n-1} (\theta_{i+1} - \theta_i) \geq \Delta \theta$$

质心分布要求

$$\begin{aligned} g_4(X_{\theta, \varphi}, U^I) &= |x_m - x_e| - \delta x_e \leq 0 \\ g_5(X_{\theta, \varphi}, U^I) &= |y_m - y_e| - \delta y_e \leq 0 \end{aligned}$$

装配制造工艺要求:

$$g_6(X_{\theta, \varphi}, U^I) = \{\forall i \in (1, \dots, n) : C_i \cap OP \in \emptyset\}$$

式中

y ——目标函数;

ΔV_{ij} ——待布置物体间的干涉体积;

S_{ij} —— 刀间距;

h —— 滚刀贯入量;

β —— 岩石破碎角;

(x_m, y_m) —— 滚刀质心的实际坐标;

(x_e, y_e) —— 滚刀质心的期望坐标;

$(\delta x_e, \delta y_e)$ —— 刀盘总体质心误差许用值;

$C_i \cap OP \in \emptyset$ —— 滚刀、支撑筋与刀盘上其他零部件的布置不干涉;

F_{si} —— 滚刀 C_i 对刀盘的侧向反作用力。

4 协同进化求解方法

对于建立的刀群布置和盘体结构设计的耦合优化模型, 5 个优化目标之间相互联系、相互制约类似于自然界中的互利共生关系。由于模型的复杂性拟采用协同进化算法中的合作式协同进化遗传算法。协同进化遗传算法是一种基于协同进化理论的新型进化算法, 可以模拟自然界中各种群的协同互补进化, 从而弥补旧的进化算法所缺少的协作共生机制。

如图 9 所示, 在对耦合问题求解时, 需要将其解耦分解为若干个子问题。子问题的数量应该取的合适, 既不能多也不能少。根据结构及功能的不同可以很自然地将滚刀布置与支撑筋布置问题分解为两个子问题, 每一个子问题包含相应的受力计算方法及布置方法, 但是不同区域的滚刀由于受力情况不同应当分为两个子问题。总体优化模型被分解为 3 个子问题后, 需要对不同的子问题进行编码, 以便通过协同进化遗传算法进行求解, 可以采用实数编码机制分别对子问题进行编码。在耦合设计问题中滚刀的位置极角与支撑筋位置初始角由染色体的基因表示, 子群体中的解与其对应的染色体可以

表示为

$$\mathbf{X}_\theta^1 = \mathbf{v}^1 = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_1})^T,$$

$$\mathbf{X}_\theta^2 = \mathbf{v}^2 = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n_2})^T,$$

$$\mathbf{X}_\varphi^3 = \mathbf{v}^3 = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n_3})^T$$

$$n = n_1 + n_2 + n_3$$

每一个子群体可以表示为

$$\mathbf{P}_1 = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1n_1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{m1} & \theta_{m2} & \dots & \theta_{mn_1} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_2 = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1n_2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{m1} & \theta_{m2} & \dots & \theta_{mn_2} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P}_3 = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1n_3} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_{m1} & \theta_{m2} & \dots & \theta_{mn_3} \end{pmatrix}$$

式中, m 为子群体规模。

在种群间合作和竞争是两种最典型的相互作用方式。本文采用群体合作机制来维持种群间合作与竞争的平衡状态。子种群的协作主要是由某子种群中的个体与其他子种群的个体协作实现的, 即基于某种协作机制进行个体之间的协作。常用的个体选择方法有: 随机选择法; 最优个体选择法; 合作群体选择法。综合考虑后选用最优个体法。除了确定选择个体的方法外, 还要确定选择的时机, 通常在协同进化过程中需要周期性地更新合作个体而且周期不能过长。

在完成适当的合作个体选择之后, 需要对个体的适应度进行计算。个体在其所在种群对问题求解的贡献程度即个体的适应度。个体之间的合作机制依赖于对子种群中个体适应度的评价, 同时个体适应度也是衡量方案优劣的标尺。为了便于对优化方案中子种群适应度进行评价, 现将原优化函数中所有的目标和约束条件合成为一个适应度评价的目标函数, 即

$$\begin{aligned} F(x) = & \lambda_1 C_1 f_1(x_{\theta, \varphi}) + \lambda_2 C_2 f_2(x_{\theta, \varphi}) + \lambda_3 C_3 f_3(x_{\theta, \varphi}) + \\ & \lambda_4 C_4 f_4(x_{\theta, \varphi}) + \lambda_5 C_5 f_5(x_{\theta, \varphi}) + \\ & \lambda_6 C_6 g_1(X_{\theta, \varphi}, U^I) + \lambda_7 C_7 g_2(X_{\theta, \varphi}, U^I) + \dots + \\ & \lambda_{11} C_{11} g_6(X_{\theta, \varphi}, U^I) \end{aligned}$$

式中 λ_k —— 适应度评价的权重 ($k = 0, 1, \dots, 11$);

C_k —— 归一化系数 ($k = 0, 1, \dots, 11$)。

该评价函数值越小则表明优化方案性能越优, 因此在采用协同进化算法不同循环代次的结果中选取适应度值最小的一组方案作为最优方案。

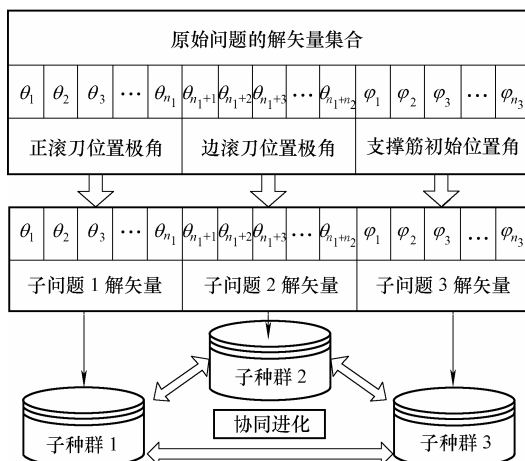


图9 子问题分解与协同进化过程

5 工程实例验证

本文以引洮隧道工程为例进行刀盘上滚刀群与支撑筋布置设计,在如图 10 所示的面板式刀盘上布置 43 把滚刀,已知条件如下。① 刀盘基本参数:直径 $D=5.65$ m,角速度 $\omega=6$ r/min= $0.628\ 3$ rad/s,每一把滚刀的质量 $m=150$ kg,直径 $D=432$ mm,贯入量 $h=10$ mm,刃角 $\alpha=2.094\ 34$ rad。三种滚刀数量分别为:中心刀 $n_1=8$ 、边刀 $n_2=13$ 、正刀 $n_3=22$ 。② 地质参数:该标段岩石以混合花岗岩为主,无侧限抗剪强度 $\tau=5\sim 8$ MPa,单轴抗压强度 $\sigma=50\sim 80$ MPa。

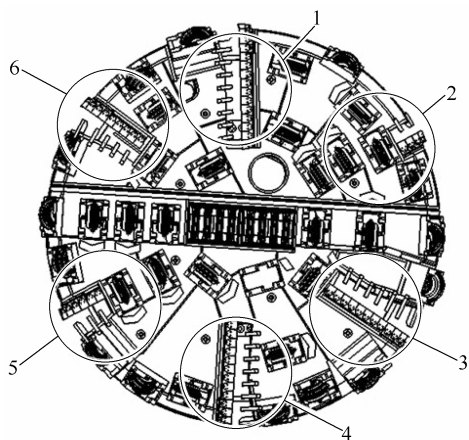


图 10 引洮隧道工程的 TBM 刀盘

对刀盘布置的技术要求如下:刀盘总体质心位置的期望值($x_e=0$ mm, $y_e=0$ mm),刀盘总体质心位置误差的允许值($\delta x_e=5$ mm, $\delta y_e=5$ mm)。根据施工技术要求,刀盘上面布置 1 个人孔,人孔的半径为 200 mm;6 个出碴口,出碴槽的尺寸和位置见表 1 所示。滚刀刀间距位置见表 2 所示。

表 1 出碴槽的尺寸和位置

出碴槽号	极角/rad	长度/mm	宽度/mm
1	0.61	2 400	500
2	1.388	900	722
3	2.543	900	722
4	3.752	2 400	500
5	4.529	900	722
6	5.846	900	722

用协同进化算法进行优化时,设米字型的可行分支数目为 16,随机运行 30 次,每一次最大循环步数为 5 000。每次使用协同进化算法对优化模型进行求解时,将会对系统中的随机数进行重置。通过 30 次的随机计算,得到 30 组不同的优化结果,每组结果都是在 5 000 次循环计算中按照适应度选取

的最优解。根据第 4 节提出的协同进化遗传算法求解,优化方案与原始方案布置对比见表 3,原方案布局图与优化方案布局图见图 11 所示。

表 2 滚刀刀间距位置

序号	刀间距 ρ /mm	序号	刀间距 ρ /mm
1	90	23	1 950
2	176	24	2 034
3	258	25	2 118
4	344	26	2 202
5	428	27	2 286
6	514	28	2 370
7	596	29	2 454
8	682	30	2 494
9	767	31	2 534
10	852	32	2 571
11	937	33	2 604
12	1 022	34	2 635
13	1 107	35	2 662
14	1 192	36	2 686
15	1 277	37	2 686
16	1 362	38	2 704
17	1 446	39	2 727
18	1 530	40	2 727
19	1 614	41	2 817
20	1 698	42	2 817
21	1 782	43	2 817
22	1 866		

表 3 优化方案与原始方案布置对比

布局方案	原始方案	改进方案	
		最好	平均
牵连惯性力 F_e /kN	0.244	0.017	0.072
不平衡力矩 M_v /(kN·m)	154.8	20.9	35.2
侧向力 F_s /kN	11.60	0.42	15.20
质心偏移 x_m /mm	-2.100	0.035	0.142
质心偏移 y_m /mm	-0.200	-0.014	1.200
最大等效应力 σ_{\max} /MPa	—	90.53	121.66
最大变形量 δ_{\max} /mm	—	-0.51	-0.57
非顺次滚刀	4	3	5

由表 3 和图 11 可知,原始方案相比,本文求解的优化方案牵连惯性力最多减小 93%,平均减小 70.5%;不平衡力矩最多减小 86.5%,平均减小 77.3%;侧向力最多减小 96.4%,平均减小 24.1%;质心偏移最多减小 98.2%;平均减小 42.7%;最大等效应力最多减小 51.8%,平均减小 35.2%;最大变形量最多减小 35.4%,平均减小 27.8%。以上结果说明本文提出的刀群布置与盘体结构耦合优化的方案是合理有效的。

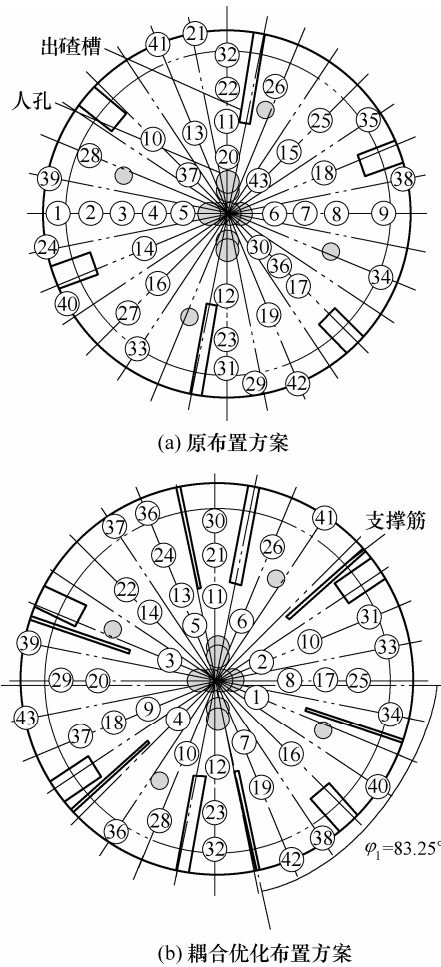


图 11 耦合优化布置方案图与原布置方案图对比

6 结论

(1) 本文分析了刀群与盘体支撑结构之间空间位置耦合以及支撑结构与刀盘强度刚度之间的非线性耦合关系。

(2) 建立了刀群与刀盘支撑结构耦合布置优化模型。

(3) 提出了多子系统协同进化的刀具适应性布置与盘体结构耦合设计方法。

(4) 以引洮工程为例验证了本文提出的刀群与盘体支撑结构耦合布置设计方法的合理性和有效性, 相比于原方案, 本文求解方法可以同时进行滚刀群与盘体支撑筋布置耦合优化设计, 优化方案的最大等效应力、最大变形量、不平衡力矩、不平衡力、顺次角度等指标相比原方案降低了 30% 以上。

TBM 滚刀群与刀盘盘体结构耦合设计问题涉及因素众多, 围岩边界复杂, 本文现阶段仅考虑了滚刀群、刀盘盘体支撑筋与刀盘静强度刚度之间的耦合设计, 下一步将从评价指标以及涉及因素方面更全面的进行分析, 包括刀盘主结构参数、刀盘动态特性等方面, 研究滚刀群、刀盘主结构参数与刀

盘动态特性之间的耦合关系。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020) [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
PRC State Council. Long-term scientific and technological development plan(2006~2020)[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [2] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1965, 2: 57-73.
- [3] 张照煌, 叶定海, 赵庆玉. 岩石掘进机刀具间距的确定及分析[J]. 工程机械, 2002(11): 11-12.
ZHANG Zhaohuang, YE Dinghai, ZHAO Qingyu. Spacing design of rock tunnel boring machine [J]. Construction Machinery, 2002(11): 11-12.
- [4] GONG Qiuming, ZHAO Jian, HEFNY A M. Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 263.
- [5] SNOWDON R A, RYLEY M D. The effect of hydraulic stiffness on TBM stiffness[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1982, 20(5): 203-214.
- [6] OZDEMIR L, WANG F D. Mechanical tunnel boring prediction and machine design(final report)[R]. Colorado School of Mines, 1979.
- [7] GERTSCH R, GERTSCH L, ROSTAMI J. Disc cutting tests in Colorado red granite: Implications for TBM performance prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(2): 238-246.
- [8] CIGLA M, YAGIZ S, OZDEMIR L. Application of tunnel boring machines in underground mine development [C/CD]// Proceedings of the 17th International Mining Congress and Exhibition, Ankara, Turkey, 2001.
- [9] 霍军周, 孙伟, 郭莉, 等. 多滚刀顺次作用下岩石破碎模拟及刀间距分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(1): 96-99.
HUO Junzhou, SUN Wei, GUO Li, et al. Numerical simulation of rock fracture process induced by multi-disc-cutters and cutters spacing design [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(1): 96-99.
- [10] 谭青, 易念恩, 夏毅敏, 等. TBM 滚刀破岩动态特性与最优刀间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2453-2464.

- TAN Qing, YI Nianen, XIA Yimin, et al. Research on rock dynamic fragmentation characteristics by TBM cutters and cutter spacing optimization [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2453-2464.
- [11] 王家骅. 国外岩石隧道掘进机纵横谈-第二部份-刀具, 刀盘及其它[J]. 制冷空调与电力机械, 1980(3): 2-13.
- WANG Jialu. Research on foreign rock tunnel boring machines - Part II - knives, cutter and other [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 1980(3): 2-13.
- [12] 纪昌明, 张照煌. 全断面岩石掘进机刀盘上刀具布置规律研究[J]. 建设机械技术与管理, 2008(4): 23.
- JI Changming, ZHANG Zhaohuang. Research on blade collocation scheme of all section rock TBM [J]. Construction Machinery Technology and Management, 2008(4): 23.
- [13] 张照煌, 乔永立. 全断面岩石掘进机滚刀布置规律[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 172-177.
- ZHANG Zhaohuang, QIAO Yongli. Disc cutters layout design of full face rock TBM [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 172-177.
- [14] HUO Junzhou, SUN Wei, CHEN Jing, et al. Disc cutters plane layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) based on different layout patterns[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61(4): 1209-1225.
- [15] SUN Wei, HUO Junzhou, CHEN Jing, et al. Disc cutters' layout design of the full-face rock tunnel boring machine (TBM) using a cooperative co-evolutionary algorithm[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(2): 415-427.
- [16] 蒲毅, 刘建琴, 郭伟, 等. 土压平衡盾构机刀盘刀具布置方法研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 161-168.
- PU Yi, LIU Jianqin, GUO Wei, et al. Research on cutting tool layout method of earth pressure balance shield[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 161-168.
- [17] MAIDL B, SCHMID L, RITZ W, et al. Hardrock tunnel boring machines[M]. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008.
- MAIDL B, SCHMID L, RITZW, et al. Hardrock tunnel boring machines[M]. Berlin: Wiley Architecture and Technical Sciences GmbH & Co, KG, 2008.
- [18] 刘景春, 贾寒飞, 张丽华. 全断面岩石掘进机刀盘简介[J]. 重工与起重技术, 2006(2): 1-4.
- LIU Jingchun, JIA Hanfei, ZHANG Lihua. Survey on full face rock TBM[J]. Heavy Industrial & Hoisting Machinery, 2006(2): 1-4.

作者简介: 霍军周(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机械结构动态性能优化与检测。

E-mail: huojunzhou@dlut.edu.cn

孙伟, 男, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为掘进装备动态协调控制。

E-mail: sunwei@dlut.edu.cn

欧阳湘宇, 男, 1990 年出生。主要研究方向为 TBM 刀盘动态特性分析。

E-mail: onjon@outlook.com

虞诗强, 男, 1986 年出生。主要研究方向为 TBM 滚刀群布置设计。

E-mail: yushiqiang@dlut.edu.cn

张旭, 女, 1989 年出生。主要研究方向为 TBM 刀盘系统结构设计。

E-mail: zhangxu8903@gmail.com