

基于现场测试的硬岩掘进机振动特性*

邹晓阳, 米永振, 郑 辉

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海, 200240)

摘要 硬岩掘进机(tunnel boring machine, 简称 TBM)在滚刀破岩力的强冲击激励下振动剧烈。从激励、结构和边界条件等方面分析 TBM 的振动机理,指出 TBM 动力学理论建模的难点,提出基于现场振动测试研究 TBM 振动特性和指导理论建模。根据施工环境,确定 TBM 现场振动测试方案,包括测试系统组成、测点布置和数据采集,应用于实际工程中 TBM 掘进振动加速度测试,基于现场测试数据分析 TBM 的振动特性。结果表明,主轴承附近电机测点的振动加速度有效值达 $20\sim 30\text{ m/s}^2$,主梁、撑靴测点的振动加速度达到 $3\sim 6\text{ m/s}^2$,刀盘驱动系统的振动频率较高,支撑-推进系统的振动频率较低,TBM 子结构表现为多模态耦合振动。现场测试揭示了振动机理,为 TBM 动力学建模分析和减振设计提供了技术依据。

关键词 硬岩掘进机;振动机理;现场测试;振动分析;多模态耦合

中图分类号 TH113.1;TD421.5

引 言

硬岩掘进机适应于由中硬岩或硬岩构造的地层隧洞的掘进施工,其掘进速度可达到常规钻爆法的 $4\sim 10$ 倍,且对地扰动小、安全环保,在公路、地铁、水利等隧洞工程的建设中发挥了重要作用^[1]。TBM 掘进时受到具有强冲击特性的滚刀破岩力和刀盘驱动系统齿轮啮合非线性力的作用振动剧烈,容易导致滚刀磨损、刀圈断裂、刀盘开裂、齿轮崩齿和主轴承寿命降低等一系列问题,不利于 TBM 的正常工作^[2-4]。

近年来,针对 TBM 的动力学问题开展了大量的研究工作。Zhao 等^[5-6]建立了 TBM 掘进的 3D 仿真模型,研究围岩变形使护盾受挤压的问题,表明围岩与护盾相互作用是关键因素。赵勇等^[7]研究了通过改变推进系统液压缸配置的方法增加 TBM 的顺应性,而 Deng 等^[8]用此方法避免 TBM 系统的共振。Li 等^[3]和 Sun 等^[4]分别研究了刀盘驱动系统的动态特性。张红星等^[9]从主机结构刚度及刀盘结构形式方面讨论了刀盘振动问题。Huo 等^[10-11]通过理论仿真计算和现场测试结合研究了 TBM 振动特性。以上研究表明,TBM 的动力学行为与围岩-结构相互作用、刀盘驱动系统和推进系统等因素

密切相关。然而,结构方面的定性分析和理论仿真计算得到的振动特性结果还较为欠缺,TBM 振动问题的研究有待加深。

笔者从激励、结构和边界条件等方面分析 TBM 的振动机理,并基于此讨论影响 TBM 动力学特性的复杂因素,最后结合现场振动测试对 TBM 的振动特性进行分析。

1 TBM 振动机理分析

TBM 常用于硬岩掘进。掘进时,左右撑靴径向支撑于洞壁上,推进缸将刀盘向前推,刀盘旋转带动滚刀进行连续破岩。

盘形滚刀分布于刀盘面上,如图 1 所示。滚刀破岩力分布于刀刃和岩石的接触区,可等效为相互垂直的 3 个力,即法向力 F_N ,切向力 F_S 和滚动力 F_R 。 F_N 和 F_R 可由下式^[12]计算

$$\begin{cases} F_N = CTr\varphi \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \sigma_r S}{\varphi \sqrt{Tr}}} \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \\ F_R = CTr\varphi \sqrt{\frac{\sigma_c^2 \sigma_r S}{\varphi \sqrt{Tr}}} \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \\ \varphi = \cos^{-1}\left(\frac{(r-p)}{r}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $C=2.12$,为与岩石特性无关的常数; T 为刀

* 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2013CB035403)
收稿日期:2016-03-12;修回日期:2016-04-12

刃宽度; r 为滚刀半径; σ_c 为岩石单轴抗压强度; σ_t 为岩石的巴西间接拉伸强度; S 为刀间距, φ 为滚刀-岩石接触角; p 为滚刀侵入深度; F_S 约为 F_N 的 0.1 倍^[4]。

由式(1)可见,破岩力与岩石力学参数、地质状况、滚刀几何参数、刀具分布、掘进参数等相关。 F_N 远大于 F_S 和 F_R ,在破岩中起主导作用。

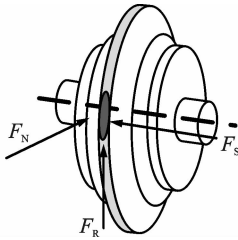


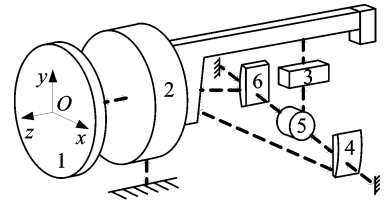
图1 滚刀破岩力

Fig.1 Rock breakage forces loading on disc cutter

掘进时 TBM 的剧烈振动现象表明破岩力是引起系统振动的主要外激励,破岩动态力对于 TBM 振动具有重要影响,而式(1)表示破岩力的平均值。滚刀在岩石内形成压力核,使岩石内部产生裂纹。裂纹扩展使岩石剥落时,聚集在压力核中的能量瞬间释放引起滚刀的冲击载荷。由于岩石是矿物的混合物,不同岩石参数和掘进参数,给不同破岩点的压力核能量和剥落的岩石大小不一,施加在滚刀上的破岩动态力表现出冲击、无规变化、不确定、复杂、非线性等特点,最大值可达到均值数十倍,且动态力振动能量主要分布于低频。离刀盘中心越远,滚刀速度越快,刀盘刚度越低,因此滚刀动态力峰值越大,均值越低^[2]。目前,破岩动态力的获取主要通过现场测试或有限元仿真。现场测试结果的普遍意义有待研究,有限元仿真则难以考虑众多复杂的因素。真实破岩动态力未知使得从理论仿真上深入分析 TBM 的振动特性变得困难。

TBM 主机包含刀盘驱动系统和支撑-推进系统,整机是复杂的装配体,主要有刀盘、护盾-主梁装配体、鞍架、支撑缸和左右撑靴等子结构,护盾、撑靴与围岩接触形成了 TBM 的边界条件。子结构之间、结构与围岩之间的相互连接和相互作用关系如图 2 所示。

振动能量从刀盘处输入,通过主轴承和齿轮啮合传递至护盾-主梁装配体,进而传递至鞍架、支撑缸和撑靴,引起系统整体振动。刀盘面上多点多维激励力将引起结构在空间中的 6 个刚体自由度耦合振动。因主梁等结构刚度较低,也将导致结构的弹性振动。因此,TBM 振动是包含多个复杂形状子结构且子结构存在刚柔耦合振动的多体动力学问题。



1.刀盘; 2.护盾-主梁装配体; 3.鞍架
4.左撑靴; 5.支撑缸; 6.右撑靴

图2 TBM子结构相互连接关系

Fig.2 Connections between sub-structures of TBM

TBM 子结构的连接关系也较为复杂。如图 3 所示,刀盘驱动系统为含有多小齿轮-内齿圈啮合的冗余驱动系统,有 N 对齿轮啮合,驱动链为电机-小齿轮-内齿圈。其中,齿轮啮合力可表达^[13]为

$$\begin{cases} F_{pi} = k_{pi}(t)f(x_{pi}, b_{pi}) + c_{pi}\dot{x}_{pi} \\ f(x_{pi}, b_{pi}) = \begin{cases} x_{pi} - b_{pi} & x_{pi} > b_{pi} \\ 0 & |x_{pi}| \leq b_{pi} \\ x_{pi} + b_{pi} & x_{pi} < -b_{pi} \end{cases} \\ k_{pi}(t) = k_{mi} + \sum_{j=1}^{\infty} k_{nj} \cos(n\omega_{ci}t + \varphi_j) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $k_{pi}(t)$ 为时变啮合刚度; k_{mi} 为平均啮合刚度; ω_{ci} 为啮合频率; b_{pi} 为半啮合间隙; c_{pi} 为啮合阻尼系数; x_{pi} 为包含啮合误差在内的轮齿啮合相对位移。

可见,齿轮啮合含有非线性时变啮合刚度、啮合间隙、啮合误差等非线性因素。

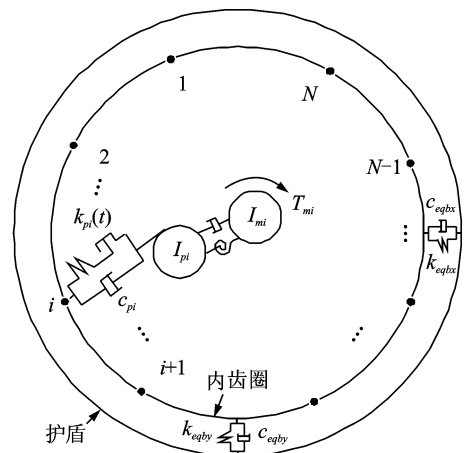


图3 刀盘驱动系统

Fig.3 Cutterhead driving system

啮合间隙和啮合误差使轮齿啮合经历碰撞、接触、分离等过程,在接触过程中时变啮合刚度引起时变啮合力。对于冗余驱动系统,由于多电机驱动难以完全同步,多对啮合齿轮变形不完全相同,各对齿轮啮合力不同,造成整个驱动系统啮合载荷不平衡^[14]。小齿轮-内齿圈啮合力的动态变化和驱动系统啮合载荷不平衡,使驱动系统内部产生冲击振动。

振动通过内齿圈传递至刀盘,通过小齿轮传递至支撑-推进系统,影响 TBM 整机的动态特性。另外,支撑-推进系统的液压脉动力也是 TBM 整机振动的部分激励力^[15]。考虑刀盘驱动系统的非线性因素和支撑-推进系统的机-液耦合作用,将使 TBM 整机的多体多自由度刚柔耦合动力学特性更加复杂。

TBM 的边界中,撑靴-围岩接触形成 TBM 推进支撑点,在正常掘进过程中保持稳定。而护盾-围岩接触由于护盾在围岩上摩擦前进,形成随机变化的支撑条件,对 TBM 的动力学特性影响很大。在硬岩掘进中,滚刀对隧洞有一定的超挖。由于围岩变形小,护盾与围岩之间存在间隙,只有底护盾与围岩具有较为紧密的接触^[6]。围岩对护盾的弹性支撑作用可用 Winkler 地基模拟。由于围岩对护盾存在径向、圆周切向和轴向切向三个方向的作用,可用三维 Winkler 地基模型来模拟护盾-围岩相互作用^[16]。其中图 4 所示为径向弹簧分布。硬岩掘进中护盾-围岩接触的径向、圆周切向和轴向切向的等效刚度 k_{sn} , k_{st} 及 k_{sz} 计算如下

$$\begin{cases} k_{sn} = E_s / [R_T (1 + \nu)] \\ k_{st} = k_{sn} / 3 \\ k_{sz} = k_{sn} / 3 \end{cases} \quad (3)$$

其中: E_s 为岩石的弹性模量; ν 为泊松比; R_T 为隧洞半径。

实际上,护盾与围岩之间还存在摩擦作用,且由于振动的影响,护盾与围岩之间将发生接触和分离现象,且接触压力的改变影响摩擦力的大小,因此护盾-围岩相互作用存在弹性作用、滑动摩擦和分离等状态。如果掘进过程中考虑增大支撑刚度,可将左、右侧护盾和顶护盾支撑在围岩上,因此 TBM 建模时需考虑实际情况建立合理的护盾-围岩接触模型。护盾-围岩接触的可变支撑条件增加了 TBM 动力学建模的复杂性。

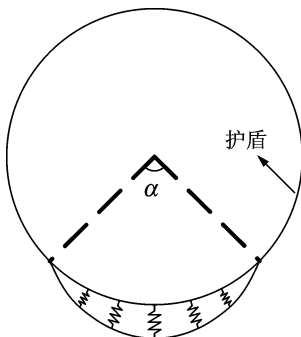


图 4 护盾-围岩接触的径向 Winkler 地基模型

Fig. 4 Winkler foundation model for shield-rock mass contact in radial direction

如前所述,真实的破岩力难以获得,同时由于结构的复杂性、TBM 动力学模型中的连接刚度和阻尼值也难以确定,且部分数值需要通过实验才能确定。这就使 TBM 振动特性的理论分析和数值仿真研究变得困难,而已有的仿真计算结果都较为简单,难以描述实际振动的复杂性。通过现场测试则能较为真实和完整地了解 TBM 的振动特性,同时为建立合理的动力学理论模型提供指导。

2 TBM 现场振动测试

TBM 在硬岩掘进中振动问题严重,目前对其振动特性所知甚少。激励、结构和边界条件 3 方面因素的复杂性,决定了 TBM 的振动特性较为复杂,增加了 TBM 振动研究的困难。通过现场测试则能准确快速地了解 TBM 的振动特性。

TBM 整机振动特性包括刀盘驱动系统的振动特性和支撑-推进系统的振动特性。刀盘驱动系统的振动特性可通过刀盘、主轴承、电机等结构的振动了解。由于刀盘在掘进过程中旋转,其振动可通过无线传感器测量,而主轴承外圈和电机振动的测量则可用有线传感器测量。如图 2 所示,支撑-推进系统的振动特性主要为护盾-主梁装配体和撑靴等结构的振动特性。因此,TBM 振动测量可将测点布置在主轴承外圈附近、电机、主梁和撑靴上,如图 5 所示。考虑到测试过程的安全问题,动态数据采集系统固定在主梁后端附近,通过无线方式与控制其工作的笔记本电脑进行通讯。各测点的振动信号通过现场振动测试系统同步采集,即得到掘进时 TBM 整机振动的相关数据。

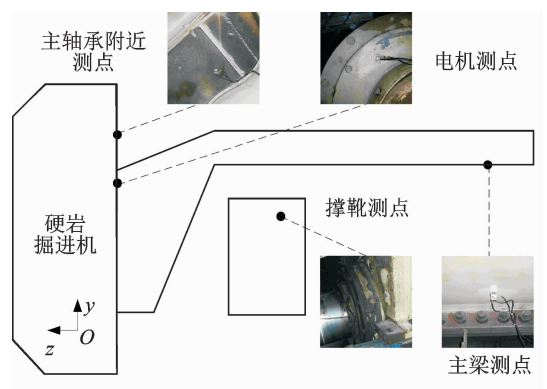


图 5 TBM 现场振动测试测点

Fig. 5 Measuring points in TBM field vibration test

利用图 5 所示的测试系统对辽西北引水工程的某段隧洞中主梁式 TBM 进行了振动加速度测试。

测试段隧洞埋深约 250 m,岩石主要成分为花岗岩,围岩为Ⅲ类 B,为较软岩石,掘进时拱部时有少量小岩块掉落,岩体不太稳定。TBM 直径约为 8.26 m,刀盘转速约为 5 r/min,掘进速度为 2m/h 左右。传感器为压电式三向加速度传感器。在 TBM 主机上布置了 6 个测点,分别为主轴承左上部附近测点、主轴承右上部附近测点、电机测点、主梁中部底面测点、主梁末端底面测点和右撑靴测点,部分测点如图 5 所示。振动加速度方向如图所示,与图 2 的坐标系方向一致,即 y 向竖直向上、 z 向为掘进方向、 x 向水平向左。根据所测数据对 TBM 的振动特性进行分析。

3 TBM 振动特性

图 6~7 分别为主轴承电机测点和主梁末端底面测点 x, y, z 三个方向的振动加速度时域曲线和频谱。其余测点的振动加速度曲线由于篇幅所限而从略。如图所示,在破岩动态力激励下,TBM 振动加速度的时域曲线表现出不规则的强烈振荡。在主轴承附近和电机等靠近刀盘的测点,最大振动加速度可超过 100 m/s^2 ,而支撑-推进系统上的主梁和撑靴测点的最大振动加速度在 20 m/s^2 左右。

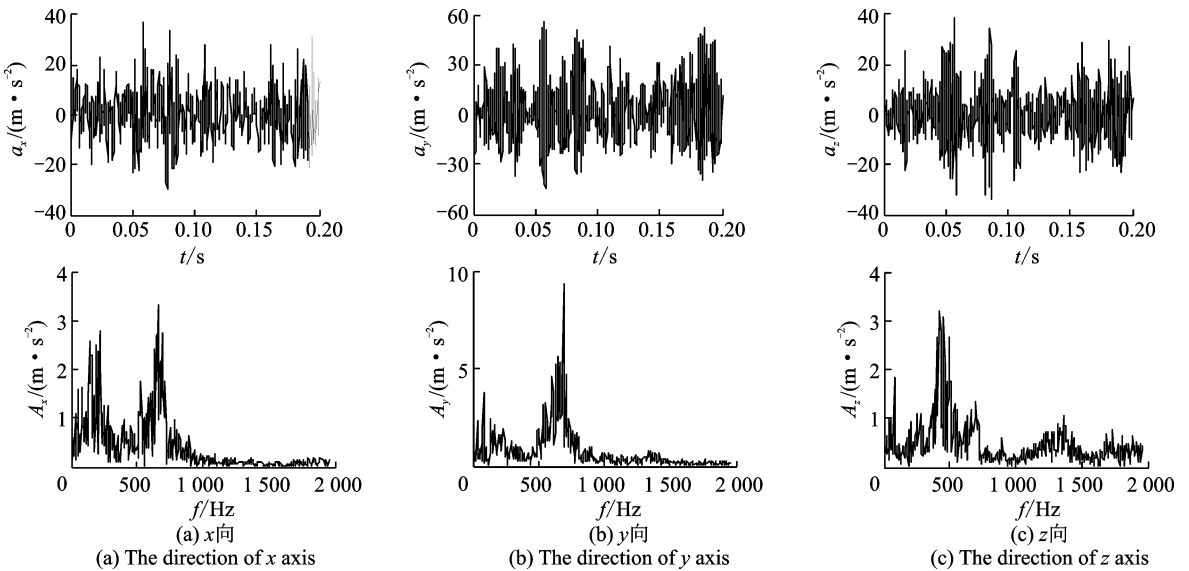


图 6 电机测点的振动加速度时域和频谱曲线

Fig. 6 Time history and spectrum of measured acceleration response at a motor

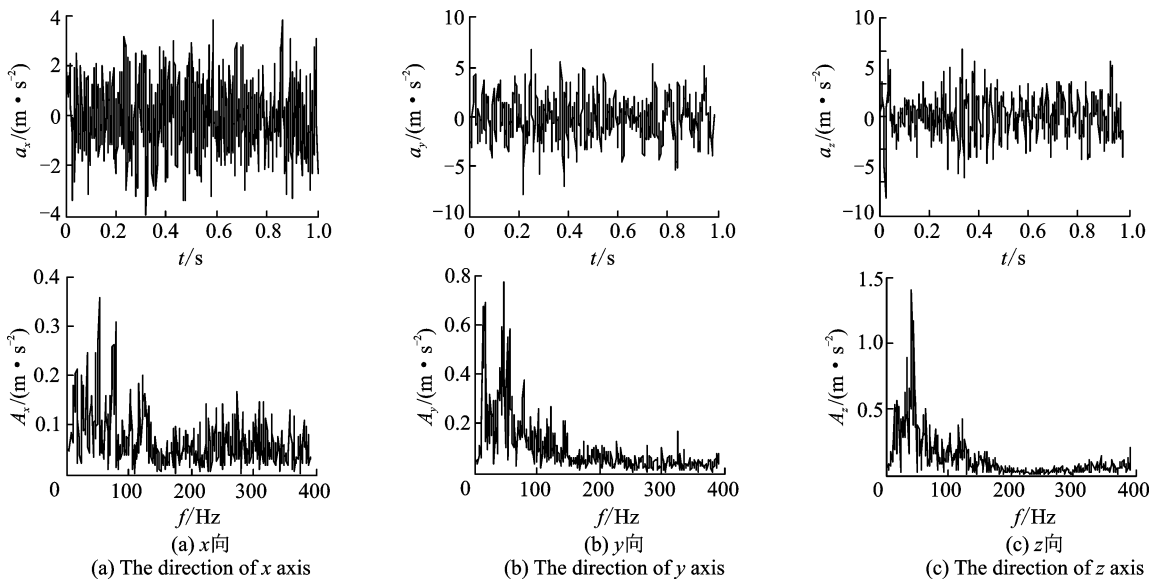


图 7 主梁末端底面测点的振动加速度时域和频谱曲线

Fig. 7 Time history and spectrum of measured acceleration response at main beam back tip

由于破岩力的强冲击特点,最大振动加速度在不同的时间段中统计会有较大的变化,而有效值(root mean square, 简称 RMS)则较为稳定。表 1 所示为 6 个测点在 3 个方向的有效值。可见,主轴承附近、电机测点的振动加速度有效值达 $20 \sim 30 \text{ m/s}^2$,主梁、撑靴测点的振动加速度达 $3 \sim 6 \text{ m/s}^2$,表明对于 TBM 整机来说,刀盘驱动系统结构的振动加速度大于支撑-推进系统结构的振动加速度。根据刀盘-主梁-撑靴的振动传递路径,离振源近,振动加速度大,即刀盘驱动系统振动加速度大,支撑-推进系统振动加速度小。致使 TBM 整机后部振动加速度小于前部的主要原因在于:电机高速转动、齿轮非线性啮合等引入大量的高频成分;底护盾与围岩实际接触,顶护盾、侧护盾与围岩不接触易导致 TBM 整机前部较小的支撑刚度;结构之间含阻尼连接有效地耗散了高频振动能量。TBM 支撑-推进系统振动加速度小,意味着掘进过程中撑靴支撑处于稳定状态,保证了 TBM 的正常掘进工作。

表 1 振动加速度有效值(RMS)
Tab. 1 RMS of vibration acceleration

测 点	$a_{\text{RMS}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$		
	x	y	z
主轴承左上部附近	8	12	12
主轴承右上部附近	12	20	26
电机	10	17	10
主梁中部底面	2	6	3
主梁末端底面	1	2	3
右撑靴	0.7	1.3	1.5

因驱动系统驱动刀盘转动,电机测点的振动加速度对破岩动态力有明显反映,其时域曲线的冲击波峰意味着一次破岩过程。从图 6 中看到,冲击波峰的大小不一且出现的间隔不等,如在 $0.11 \sim 0.15 \text{ s}$ 段无明显波峰,表明破岩动态力的无规变化特点。从冲击波峰的间隔可看出破岩动态力主要振动能量位于低频。

对 3 个方向的振动加速度进行比较,发现 x, y, z 向振动加速度依次增大,且 y, z 向振动加速度较为接近。在滚刀破岩力中,法向力与 z 向同向,且远大于切向力和滚动力,将刀盘上的多点多维破岩力进行等效合成, z 向合力将进一步增大,而 x, y 向合力因为各点切向力和滚动力方向不同而可能出现相互抵消状态,这是 z 向振动加速度最大的原因。另一方面,如图 2 所示,TBM 整机结构关于 yz 平面基本对称,关于 xz 平面对称,这种结构不对称容易导致 y, z 向振动耦合,使 y 向振动加速度也较大。

从图 6,7 的频谱图上看到,驱动系统测点的频谱峰值主要分布在 1000 Hz 以下, 1000 Hz 以上的频谱幅值较小。具体来说,主轴承附近的测点在 1000 Hz 以下有多个峰值,但不具有明显规律,这可能与破岩力特性和 TBM 中所用的滚柱轴承的复杂动态特性有关。电机测点的频谱谱峰的形状较为明显, x, y 向振动加速度峰值集中在 200 和 700 Hz 附近,而 z 向振动加速度峰值集中在 450 Hz 附近。电机测点 3 个方向的振动加速度同时在某些频率点处出现峰值,比如 140 Hz 处,表明 3 个方向的振动存在耦合,而不同的峰值频率则表明不同方向的振动特性有差别。比较发现,主轴承附近测点和电机测点在相同方向,比如 z 向的频谱峰值分布具有相似之处,在 450 Hz 附近出现峰值,表明这两个测点同处于驱动系统中,反映整个驱动系统的振动特性。由于破岩动态力的振动能量主要分布于低频,可知电机振动加速度的高频成分反映电机驱动链内齿轮啮合的冲击振动强,在电机振动中占主要地位。

主梁测点的频谱峰值主要分布在 100 Hz 以下。可以看到, x, y 向振动加速度峰值数较多,而 z 向振动加速度峰值数较少。这是由于主梁的弯曲刚度不大,在 x, y 向出现了低阶弯曲振动。对主梁 x, y 向的振动加速度进行比较,如表 1 所示,位于中部底面的值大于位于末端底面的值,表明主梁在前端和后部受到约束时,由于弯曲振动的出现,主梁中部的振动较大。撑靴测点的频谱峰值除了在 100 Hz 以下有分布,在 120 和 240 Hz 附近也有分布。撑靴的高频振动表明撑靴与围岩接触刚度, TBM 在掘进过程中撑靴支撑稳定。

对主梁和电机振动加速度的峰值频率特性进行统计,发现峰值分布的频率段不变,如主梁末端底面测点 z 向的最大峰值分布 $45 \sim 50 \text{ Hz}$ 频段,但峰值点在频段内是变化的。这可能与护盾-围岩接触由于振动产生松动使等效接触刚度小范围变化有关,反映这一边界条件对 TBM 振动的影响。

主轴承、电机、主梁和撑靴等测点的振动加速度频谱特性不同,意味着在建立系统的动力学理论模型时,对不同结构,应分别建立能反映其振动特性的模型。同一测点的 x, y, z 向的振动加速度频谱特性不同,说明子结构处于多自由度或多模态耦合振动。总的来说,刀盘驱动系统的振动加速度峰值频率处于较高频段,而支撑-推进系统的振动加速度峰值频率处于较低频段,且像主梁这类刚度较低的结构容易出现弹性振动。现场振动测试结果所反映的 TBM 振动特性,说明在 TBM 动力学理论建模时需

要考虑系统不同子结构的振动特性和子结构的刚柔耦合振动。

4 结束语

从滚刀破岩力、TBM的复杂结构以及结构与围岩的相互作用等方面对TBM的振动机理进行了定性分析,指出通过动力学理论建模研究TBM振动特性的难点,提出基于现场振动测试研究TBM的振动特性,为指导TBM动力学理论建模提供依据。

确定了TBM现场振动测试方案,对辽西北引水工程的某主梁式TBM进行了现场测试,并基于现场测试数据对TBM的振动特性进行了研究。结果表明主轴承附近、电机测点的振动加速度有效值达 $20\sim 30\text{ m/s}^2$,主梁、撑靴测点的振动加速度达到 $3\sim 6\text{ m/s}^2$,刀盘驱动系统结构的振动加速度大于支撑-推进系统结构振动加速度。从TBM整机来看, x, y, z 向振动加速度依次增大,且 y, z 向振动加速度较为接近,这与滚刀破岩力和TBM的结构特点密切相关。刀盘驱动系统的振动频率较高,驱动系统的振动频率较低,主梁等子结构由于刚度较低出现刚柔耦合振动,且子结构表现为多模态耦合振动。

基于现场测试的TBM振动特性反映了TBM振动机理,分析结果表明,对TBM进行动力学理论建模时应考虑系统不同子结构的振动特性和子结构的刚柔耦合振动,为从理论上深入研究TBM的振动特性和减小TBM的整机振动提供了支持。

参 考 文 献

- [1] Maidl B, Schmid L, Rits W, et al. Hardrock Tunnel Boring Machines [M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2008: 15-19.
- [2] Entacher M, Lassnig K, Galler R. Analysis of force diagrams of linear cutting machine-tests regarding geotechnical parameters[C]//Proceedings of the Geo-Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, Oakland, USA: ASCE, 2012: 3258-3267.
- [3] Li Xianhong, Yu Haibin, Yuan Mingzhe, et al. Research on dynamic models and performances of shield tunnel boring machine cutterhead driving system [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, 5: 1-29.
- [4] Sun Wei, Ling Jingxiu, Huo Junzhou, et al. Dynamic characteristics study with multidegree-of-freedom coupling in TBM cutterhead system based on complex factors [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1-17.
- [5] Zhao Kai, Michele J, Giovanni B. A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(4): 475-497.

- [6] Rohola H. Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 57: 37-52.
- [7] Zhao Yong, Wang Hao, Yu Haidong, et al. A stiffness-matching based evaluation approach for compliance of mechanical systems in shield tunneling machines [J]. Science China Technological Science, 2012, 55(10): 2926-2935.
- [8] Deng Kongshu, Huang Jinglong, Wang Hunagong. Layout optimization of non-equidistant arrangement for thrust systems in shield machines [J]. Automation in Construction, 2015, 49: 135-141.
- [9] 张红星, 张宁川. 803E掘进机刀盘振动问题浅探 [J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 76-78.
Zhang Hongxing, Zhang Ningchuan. Brief discussion on cutter head vibration of type 803E TBM [J]. Tunnel Construction, 2007, 27(6): 76-78. (in Chinese)
- [10] Huo Junzhou, Wu Hanyang, Li Guangqing, et al. The coupling dynamic analysis and field test of TBM main system under multipoint impact excitation [J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1-14.
- [11] Huo Junzhou, Wu Hanyang, Yang Jing, et al. Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunneling field test [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(8): 3043-3058.
- [12] Jamal R. Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 57: 172-186.
- [13] 邵浩冬, 张以都. 含摩擦的汇流传动齿轮非线性动力学分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(4): 737-743.
Gao Haodong, Zhang Yidu. Nonlinear dynamics analysis of convergent transmission [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(4): 737-743. (in Chinese)
- [14] Wei Jing, Sun Qincho, Sun Wei, et al. Load-sharing characteristic of multiple pinions driving in tunneling boring machine [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(3): 532-540.
- [15] 霍军周, 杨静, 孙伟, 等. 不同TBM支承结构形式下的围岩稳定性分析 [J]. 东北大学学报:自然科学版, 2014, 35(11): 1602-1606.
Huo Junzhou, Yang Jing, Sun Wei, et al. Stability analysis of surrounding rock under different TBM supporting forms [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2014, 35(11): 1602-1606. (in Chinese)
- [16] Oriol A, Climent M. Three dimensional structural response of segmental tunnel linings [J]. Engineering Structures, 2012, 44: 210-221.



第一作者简介: 邹晓阳,男,1983年9月生,博士生。主要研究方向为结构动力学分析与减振设计。曾发表《基于多尺度最大李雅普诺夫指数的表面肌电信号模式识别》《中国生物医学工程学报》2012年第31卷第1期)等论文。
E-mail: zouxiaoyang@sjtu.edu.cn