

# 基于人工触发闪电对击间过程近区磁场的测量与仿真

贾佳明, 刘 昆

(成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**在相关研究文献中,基于天线理论建立闪电回击天线模型得到回击过程中产生的电磁场计算结果已与传输线模型(TL)等其他回击模型的计算结果进行了详细的对比验证,并得到较好的结果。然而基于该模型,针对相关击间过程,计算在闪电通道附近磁场的有效性并未进行实验验证。文中基于2014年夏在中国科学院大气物理研究所山东人工触发闪电实验基地获取的观测数据,利用回击天线模型对由上行正先导(UPL)始发阶段的电流脉冲簇、UPL发展导致的初始连续电流(ICC)和回击后连续电流上叠加的M分量产生的磁场进行计算,并将其与实验数据进行对比研究。由仿真计算结果与实验数据对比可见,虽然在距离闪电通道78 m和970 m处的仿真结果和实验数据吻合较好,但应该注意的是天线模型只能针对雷电流流经整个闪电通道的闪电过程所产生的磁场进行计算,对于云内闪电过程所辐射的电磁场,则无法利用天线模型进行有效模拟。

**关键词:**天线理论模型;磁场;上行正先导;M分量

**中图分类号:**TN959.4

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2019.02.007

## 0 引言

雷电流回击模型主要用于描述闪电通道上电流或电荷密度的时空分布。自1941年Bruce和Golde提出闪电回击模型以来,逐渐发展了多种从不同角度提出的闪电回击模型。目前在已提出的雷电流回击模型中,根据不同相对参量的选取可分为4种:气体动力学模型或者物理模型、电磁模型、电路模型和工程模型<sup>[1]</sup>。其中气体动力学模型通常包含3个气体动力学方程,而电磁模型、电路模型和工程模型的结果则可以直接应用于闪电通道周围电磁场分布的计算<sup>[2]</sup>。与此同时,电磁模型涉及应用矩量法(MOM)等数值方法对麦克斯韦方程组进行数值求解<sup>[3]</sup>,这即对闪电通道电流的求解有了完整的解决方案,既包含了天线模型的电流也包含了传输线模型的电流。从此意义上而言,电磁模型用于研究闪电电磁效应的分析研究更为合适,此外,由于该模型可以应用当前各类电磁学数值计算方法进行求解分析,因此,可以应用各类电磁学分析软件基于该模型对闪电电磁场进行分析求解。

Podgorski等<sup>[4]</sup>、Moini<sup>[5]</sup>、Baba等<sup>[6]</sup>基于闪电通道的特征将其等效为一个有耗天线的电磁模型。该模型基于对麦克斯韦方程组的求解来计算通道中雷电流的时空分布,进而可以模拟计算闪电回击电流的远区场。Podgorski将闪电通道设置为垂直于地面并且单位长度的电阻 $R=0.7\ \Omega$ 的介质圆柱,而Moini等将 $R$ 设置为 $0.065\ \Omega$ 或者 $0.07\ \Omega$ 。Baba则将其描述为一个具备单

位长度的电阻( $1\ \Omega$ )和磁导率( $3\ \mu\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ )的负载。Moini为了模拟径向分布且包围着载流电晕核的电晕对回击速度的影响及其所包含的大量通道电荷的影响,把包围等效天线的空气介电常数设置为大于介电常数<sup>[2]</sup>并将基于天线模型(AT)计算获得的回击电磁场结果已经与传输线模型(TL)、电流随通道高度线性衰减的修订传输线模型(MTLL)、电流随通道高度呈指数衰减的修订传输线模型(MTLE)和DU模型进行详细对比验证,获得较好的效果。然而,到目前为止,应用AT模型计算闪电通道附近,由击间过程产生的磁场的有效性尚未通过实验验证,将针对该内容开展研究,基于人工引雷实验验证AT模型在实际电磁计算过程的可靠性,从而为讨论基于该模型闪电各过程所产生的电磁效应奠定基础。

目前用于计算闪电附近电磁场分布的数值分析方法主要有:数值积分<sup>[7]</sup>、时域有限差分(FDTD)法<sup>[8]</sup>、有限元法<sup>[9]</sup>、矩量法<sup>[6]</sup>和传输线法<sup>[10]</sup>。

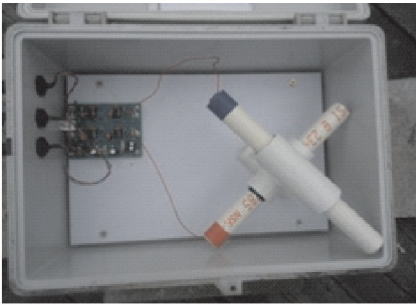
CST是一款全面、精确、集成度极高,面向3D电磁、温度、电路的三维电磁仿真软件,并且该仿真软件已广泛应用于雷电电磁仿真和防护设计,如:计算闪电击钢筋混凝土结构的建筑物时,其中的金属结构产生的感应磁场<sup>[11]</sup>,针对飞行器的闪电防护设计<sup>[12-13]</sup>,以及雷电流通过接地网时的电磁效应研究<sup>[14]</sup>。

依据文献[5],通过仿真软件CST的MS(Micro-strip)工具箱建立闪电-土壤回击模型,选择其中传输线求解器进行电磁计算,并结合山东人工触发闪电实验获得的闪电通道近场区的磁场数据,验证该仿真模型结果的正确性。

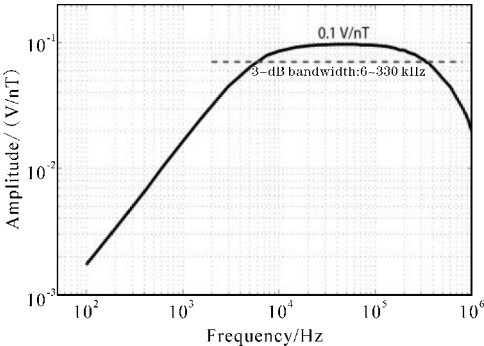
1 实验和仿真模型

1.1 实验模型

在山东滨州野外人工触发闪电实验中,基底电流的采集设备由一个0.5 mΩ的同轴分流器(带宽为 0 ~ 3.2 MHz) 和一个 Pearson 线圈(带宽为 0.9 Hz ~ 1.5 MHz),测量量程分别为2 kA和40 kA<sup>[15-17]</sup>。2014 年夏季的野外实验,在距离法拉第笼78 m和970 m分别设置了一个宽带磁天线用于采集相应的磁场,磁天线的频率响应曲线及其放大电路如图 1 所示。磁天线的3 dB带宽为 6 ~ 330 kHz,低于6 kHz时,磁天线响应特性类似于 dB/dt 的传感器。磁天线和法拉第笼(火箭发射架)的空间相对位置如图 2 所示。



(a) 磁天线和放大电路



(b) 磁天线的频率响应曲线

图 1 放大电路及磁天线频率响应曲线



图 2 2014 年夏山东野外人工触发闪电实验基地磁场测量设备分布

1.2 仿真模型

基于 CST Studio 三维电磁仿真软件建立闪电-土壤模型如图 3 所示。其中,土壤电导率和通道单位长度电阻分别设置为0.02 S/m和0.07 Ω。通道的相对介电常数设置为 $\epsilon_r=5.3$ ,保证通道中电流传播速度为 $v=1.3\times10^8$  m/s<sup>[19]</sup>。在通道底部加载电流源,并将实验中采集的基底电流数据作为电流源的激励限号(图 3)。采用不同的通道高度进行计算不同的闪电过程的电磁效应。

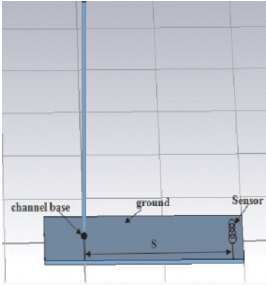


图 3 仿真模型

2 仿真计算结果和讨论

2.1 上行正先导

2014 年闪电号为 1403 的人工触发闪电在 UPL 始发阶段的电流脉冲及 UPL 持续向上发展导致的初始连续电流波形及相应的78 m、970 m处的磁场波形如图 4、图 5(a)和图 6(a)所示。图 7(a)和图 8(a)是 78 m和970 m处 UPL 始发阶段磁场脉冲放大后的结果。图 5(a)、6(a)、7(a)和 8(a)均为方位角方向的磁通密度的时间导数。

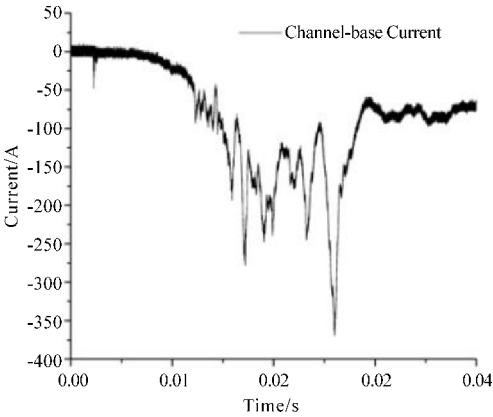


图 4 UPL 过程的基底电流

人工触发闪电实验中,总长700 m的钢丝盘绕于固定在火箭尾部的线轴上,开始端连接到接地的铜质引流杆上,钢丝随火箭上升迅速拉伸。根据高速摄像

资料可知,稳定的UPL始发于火箭上升300 m左右高空的阶段。因此,当计算由UPL始发阶段电流脉冲产生的磁场时,使用一个300 m的导线作为通道。基于对ICC和M分量过程基底电流数据的分析,以上两个过程的信号频谱能量主要集中于低于特低频( $f < 3\text{ kHz}$ ,  $\lambda > 100\text{ km}$ ),此外,由图5可见,由于UPL始发阶段的电流脉冲出现于300 m左右的高空,此后,UPL稳定向上发展,在ICC电流强度增大到一定强度值时,通道长度大约在1~3 km。但1~3 km的变化对于大于100 km的波长而言,几乎可以忽略不计,同时依据仿真结果,通道采取1 km或3 km并不会对结果有显著影响,因此,在UPL始发阶段的电流脉冲之后以3 km的闪电通道计算后续闪电过程产生的磁场。

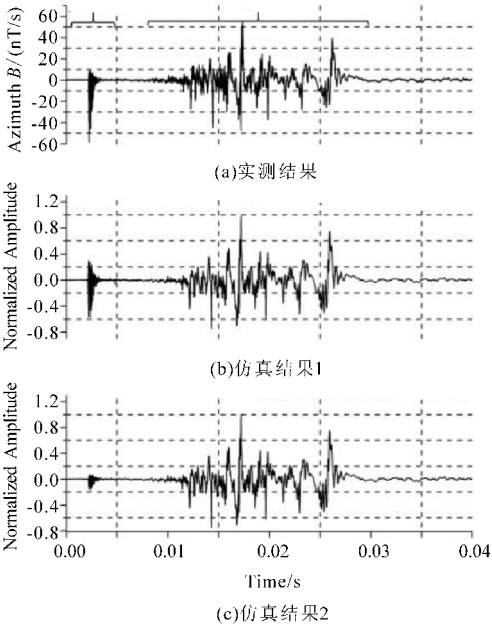


图5 78 m处实测磁场结果与仿真磁场结果对比图

图5(c)和图6(c)为所有过程始终采用3 km闪电通道对相应的磁场进行仿真计算,由图可见,在78 m、970 m处,仿真计算结果与实测数据都相去甚远,这正是由于实际产生磁场信号的通道与3 km的仿真模型通道不符导致的。当采用300 m的钢丝作为通道去计算由UPL始发阶段的电流脉冲而用3 km耗散天线通道去计算由ICC过程产生的磁场时,如图5(b)和图6(b)所示,结果的吻合较满意。为了更好地对比在78 m和970 m处初始电流脉冲产生的磁场的实验测量和仿真计算结果,将该部分放大,如图7和图8所示。由图7可见,78 m处实验测量和计算结果吻合较好。由图8可见,当闪电所产生的磁场到达970 m时,虽然信噪比明显下降,但是计算结果与测量结果仍基本吻合。由此可见,将两个不同的物理过程依据实际情况对闪电通道分开建模并仿真,所获得计算结果将与实验数据更吻合。

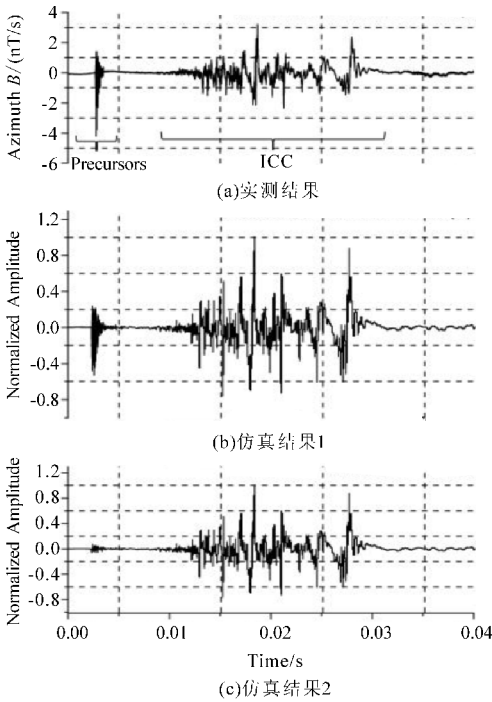


图6 970 m处实测磁场结果与仿真磁场结果对比

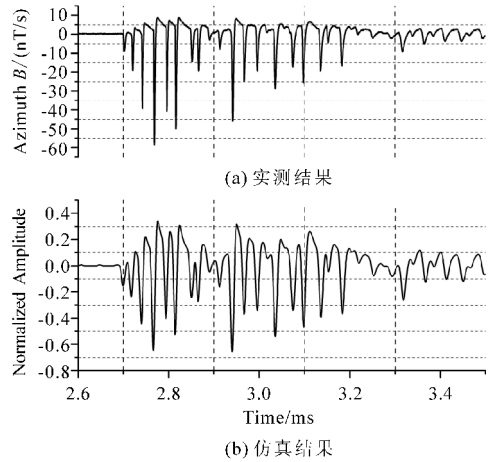


图7 UPL始发阶段电流脉冲导致的78 m处  
实测磁场结果与仿真磁场结果对比

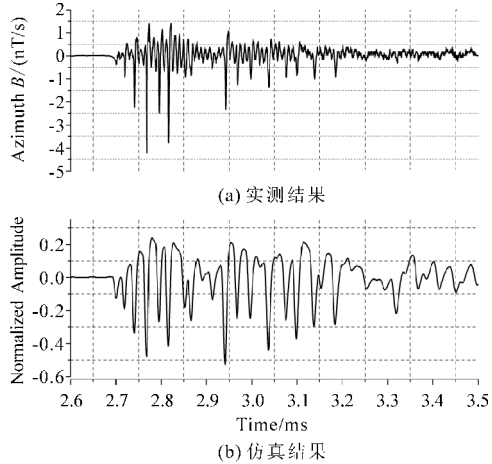


图8 UPL始发阶段电流脉冲导致的  
970 m处实测磁场结果与仿真磁场结果对比



## 2.2 M分量

2014年夏天有一次成功触发闪电(闪电号:1403),其中一段M分量过程的通道基底电流及相应的78 m和970 m处磁场测量结果如图9、图10(a)、图11所示。为了更好地比较,文中给出了未滤除噪声的结果,如图11(a)所示,相应的计算结果如图10(b)和图11(b)所示。

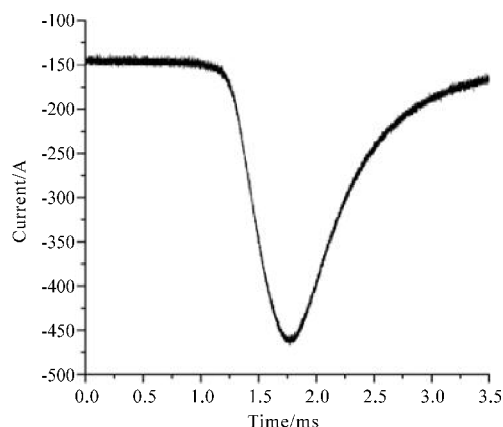


图9 M分量基底电流

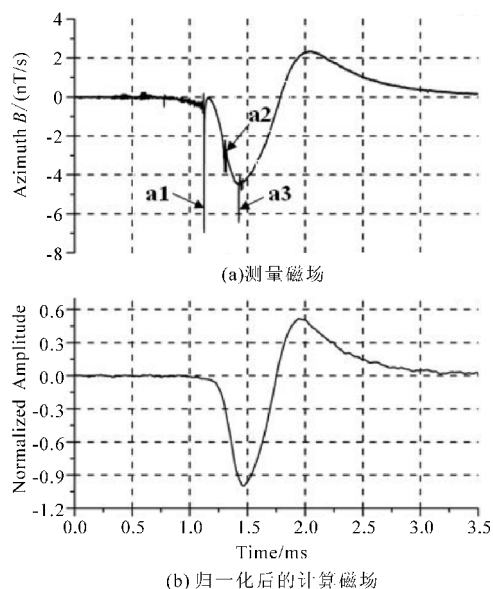


图10 M分量在78 m处磁场测量与仿真结果

慢变化过程叠加于连续电流上称为M分量,是由反冲先导与已有的闪电通道连接产生。如图10所示,在距离通道78 m处观测到的磁场波形特征解释如下:和快速负击穿有关的反冲先导,辐射出磁脉冲a1,并以光速传播到达磁天线;然而反冲先导的发生仍然驱动一个电离波沿着现有的闪电通道相对缓慢的传播,并最终流经通道基底,从而78 m处磁天线测量到由其感应分量形成的磁脉冲(由于相对距离较近)。由图10(a)可见,同时还有两个更小的快脉冲a2和a3叠加于流经通道基底的电流产生的磁脉冲,它们可能是由云内K过程产生的。由此可见,除了通道基底电流无法包含的云内过程,使用AT模型计算的78 m和970 m处的磁场都和测量结果有较好的吻合。另一方面,通

道基底电流中未包含的闪电过程总是在云内发生的,所以通过比较AT模型的计算结果和测量结果,可以区分出哪些过程极可能为云内过程。

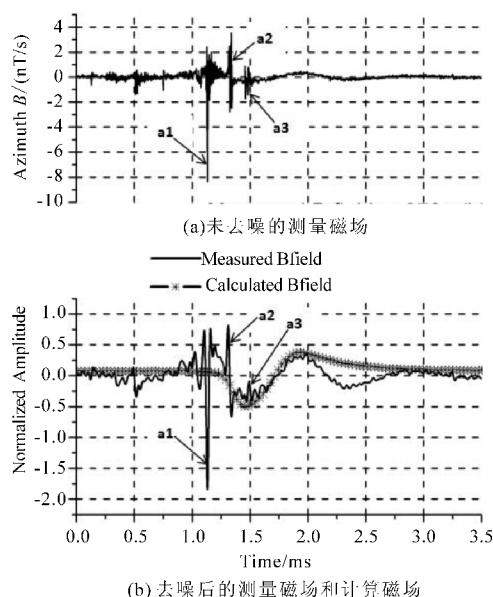


图11 M分量在970 m处磁场的测量与仿真结果

## 3 结束语

应用AT模型针对人工触发闪电中上行正先导始发阶段的电流脉冲、UPL持续向上发展导致的初始连续电流以及回击后叠加与连续电流上的M分量所产生的磁场进行了仿真计算,并将计算结果与距离闪电通道78 m与970 m的磁场实验测量结果进行对比。如果闪电过程能够体现在通道基底电流上,则距离闪电通道78 m与970 m的计算结果与实验测量结果是吻合的。事实上,文中讨论的与快速负击穿相关联的云中反冲先导,相当于一个很强的辐射脉冲,如图11(a)磁脉冲。然而该负击穿的过程并未包含在基底电流中,因此无法在通道基底测量到,但是在此之后的持续电流可以流经通道底部,换句话说,当反冲先导在云内产生时,辐射脉冲源由负击穿产生,而这一过程是与应用AT模型仿真使用的闪电通道辐射源无关的,因此,以上云内过程是无法基于AT模型进行仿真的。对于无基底电流测量结果的云内放电过程,AT模型不能进行有效的模拟计算,例如上述讨论的强K过程,该过程可以导致970 m处的计算结果与测量结果的显著区别。不过,它可以帮助分辨和分析在整个闪电过程中的云内过程。

## 参考文献:

- [1] Rakov V A, Uman M A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1998, 40: 403-426.
- [2] Rakov V A, Uman M A. Lightning physics and

- effects [J]. Cambridge university press. Cambridge, United Kingdom 2003:394.
- [3] Sadiku, M N O. Elements of Electromagnetics[J]. Orlando, Florida: Sounders College, 1994:821.
- [4] Podgorski, A S, Landt, et al. Three dimensional time domain modelling of lightning [J]. IEEE Trans. Pow. Del. 1987(2):931-938.
- [5] Moini R, Kordi B, Rafi G Z, et al. A new lightning return stroke model based on antenna theory[J]. J. Geophys. Res. 2000, 105:29693-702.
- [6] Baba Y, Ishii M. Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures [J]. IEEE Trans. Power Deliv. ,2001, 16(2):324-328.
- [7] Delfino F, Rossi M, Rachidi F. An algorithm for the exact evaluation of the underground lightning electromagnetic fields [J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat. ,2007, 49(2):401-411.
- [8] Liu Kun, Xiushu Qie, Jianxin He, et al. Estimation of Critical Electric Field of Soil Ionization based on Tangential Electric Field Method[J]. IET Science, Measurement & Technology. 2015, 9(6):758-764.
- [9] Sheshyekani K, Akbari M. Evaluation of lightning-induced voltages on multi-conductor overhead lines located above a lossy dispersive ground. IEEE Trans[J]. Power Deliv. ,2014, 29(2):683-690.
- [10] Lu G. Transient electric field at high altitudes due to lightning: possible role of induction field in the formation of elves [J]. J. Geophys. Res. ,2006, 111(D2):D02103.
- [11] Miry C, Amador E, Duquerroy P, et al. Evaluation of lightning induced magnetic fields inside reinforced concrete buildings [J]. 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, 2013:145-150.
- [12] Sun Cheng, Min Zhang. Simulation design of harness protection against lightning for aircrafts [J]. International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2014:1254-1257.
- [13] Zhang Min, Zhiyong Huang. Transient current burst analysis induced in cable harness due to direct lightning strike on aircraft [J]. Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2010:1197-1200.
- [14] Datta A J, Taylor R, Will G, et al. An Investigation of Earth Grid Performance Using Graphene-Coated Copper [J]. IEEE Access. 2015, 3:1042-1050.
- [15] 王彩霞, 郗秀书, 蒋如斌, 等. 一次人工触发闪电上行正先导的传输特征 [J]. 物理学报. 2012, 61(3).
- [16] 瞿海燕, 袁萍, 张华明, 等. 闪电放电过程的近红外光谱及温度沿放电通道的演化特征 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(8):2508-2513.
- [17] Lu G, R Jiang, X Qie, et al. Burst of intra-cloud current pulses during the initial continuous current of a rocket-triggered lightning flash [J]. Geophys Res. Lett. ,41.

## Colse Magnetic Field Driven by Continuous Charge Transfer in Rocket-triggered Lightning: Measurement and Simulation

JIA Jiaming, LIU Kun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** The electromagnetic field of return stroke calculated by using the antenna-theory (AT) model has been tested and verified with other return stroke models, such as transmission line model (TL). However, the validity of using the AT model to calculate the magnetic fields close to lightning channel has not been verified for continuing charge transfer process in lightning. In this paper, we presented the simulation of magnetic fields driven by the burst of current pulses (the so-called precursors) during the very initial stage of UPL, the ICC as due to the development of UPL and M-component in Continuous current after return stroke with AT model, and the results are compared in detail with the rocket-triggered lightning data, measured by SHATLE in the summer of 2014. The contrast of simulation results and experimental data shows that, the simulation results at 78 m and 970 m from the lightning channel are in good agreement with the experimental data, it should be noted that the antenna model can only calculate the magnetic field generated by the lightning process of the lightning current flowing through the entire lightning channel. For the electromagnetic field radiated by the in-cloud lightning process, the antenna model cannot be used for effective simulation.

**Keywords:** antenna-theory model; magnetic fields; upward positive leader; M-component