

基于圆锥曲面斜入射弹着点声学检测模型*

李健 雷鸣 贺养养

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

摘要:目前,声学精度靶测量时,一般都要求射击弹道线和靶面垂直(交角 $\leq 0.25^\circ$),否则会带来系统误差。实际测量中,通常很难保证弹道线垂直于靶面。基于激波理论,在三维空间中建立弹丸激波圆锥曲面数学模型。根据激波曲面掠过传感器阵列的时间差,提出了一种针对弹丸斜入射时的弹着点定位模型。该模型在三维空间中求解弹着点坐标,以及弹道线的俯仰角 α 和水平角 β 。利用该数学模型进行仿真研究,实验结果表明,该定位模型在斜入射时具有较高的精度。

关键词:激波锥面;斜入射;声学靶;模型仿真

中图分类号: TN912.201 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.2060

Acoustic detection model of bullet shooting at oblique incidence based on conical surface

Li Jian Lei Ming He Yangyang

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: At present, in the acoustic accuracy target measurements, it is generally required that the ballistic line and the target surface are perpendicular (Angle of intersection $\leq 0.25^\circ$), otherwise, the system will bring the error. In actual measurements, it is often difficult to ensure that the ballistic line is perpendicular to the target surface. Based on the theory of shock wave, a mathematical model of bullet shock wave cone surface is established in three-dimensional space. According to the time difference of the shock wave surface passing through the sensor array, this paper presents a method of positioning the bullet point for the projectile oblique incidence. The model solves the coordinates of the bullet point in the three-dimensional space, and the pitch angle α and the horizontal angle β of the ballistic line. The simulation experimental results show that the proposed model has high accuracy in oblique incidence.

Keywords: shock wave con; oblique incidence; acoustic target; model simulation

0 引言

武器中有其特有的声波,包括枪炮膛口波,弹头激波,爆炸波等等,声学精度靶就是利用超声速弹丸的弹头激波,到达传声器阵列上不同传声器所产生的时间差,根据定位模型来确定弹丸在靶平面的坐标^[1]。目前已有的声学精度靶模型大多是建立在弹丸垂直靶面入射的前提下,而实际射击中很难保证弹道线和预设靶面垂直^[2-6]。当弹道线与靶面具有一定倾斜角时,以往模型的测量误差仍然很大。这时,利用弹丸激波测量弹着点时,就需考虑弹丸斜入射带来的影响。而弹丸的斜入射是具有普遍性的^[7],因此需要研究一种弹丸斜入射时的定位模型来提高声学精度靶的测量精度。本文从弹丸激波的圆锥曲面推

导入手,结合 TDOA 声定位技术,建立了一种适用于弹丸斜入射的三维空间弹着点定位模型。该模型区别于斜入射误差修正模型,而是建立在激波曲面的基础上,直接求解弹着点坐标、俯仰角 α 和水平角 β ,文中分析了模型的测量原理,给出了原始的斜入射定位公式。

1 弹丸激波理论

当弹丸以超声速在空中飞行时,弹头挤压空气,会引起弹丸附近的空气膨胀压缩,形成弹丸激波^[8]。有实验表明,弹丸在空气中运动时,相当于一个运动的声源,当弹丸的运动速度大于当地声速时,该弹丸激波信号呈圆锥体,也就是说所产生的冲击波信号以声速 c 沿锥形面向外扩散,该锥形界面又被称之为马赫锥,而飞行的弹丸所处的

收稿日期:2017-05

* 基金项目:西安工业大学科研创新团队建设计划项目资助

位置是马赫锥顶点的位置^[9]。弹丸激波的示意图如图1(a)所示。其中 θ 表示弹丸激波的圆锥半角, M_a 表示弹丸速度的马赫数, c 表示当前情况下的声速, v 表示弹丸的飞行速度,则有:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin\left(\frac{1}{M_a}\right) \\ M_a = \frac{v}{c} \end{cases} \quad (1)$$

在弹道线的周围放置激波传感器,通过实验可以观察到弹丸激波成“N”形,因此激波又叫“N波”^[8-9]。传感器感受压力随时间变化如图1(b)所示。

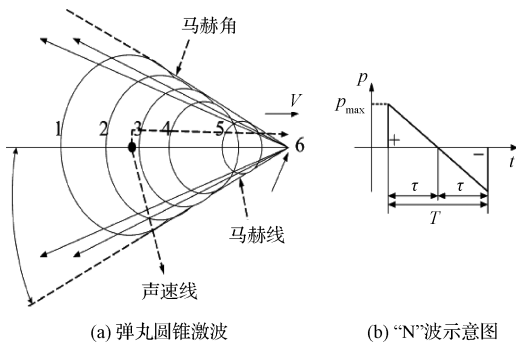


图1 弹丸圆锥激波及“N”波示意图

2 弹丸激波圆锥曲面的推导

在推导斜入射弹着点定位模型时,首先从推导确定弹

$$|MM'| = \sqrt{\frac{\begin{vmatrix} y-y_p & z-z_p \\ n & l \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} z-z_p & x-x_p \\ l & m \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} x-x_p & y-y_p \\ m & n \end{vmatrix}^2}{m^2+n^2+l^2}} \quad (5)$$

$$|PM| = [(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z-z_p)^2]^{1/2} \quad (6)$$

由式(4)(6)可得激波圆锥曲面方程:

$$\begin{aligned} \sin^2(\theta) \times [(x-x_p)^2 + (y-y_p)^2 + (z-z_p)^2] = \\ [-(y-y_p)\cos\alpha\cos\beta - (z-z_p)\sin\alpha]^2 + \\ [(z-z_p)\cos\alpha\sin\beta + (x-x_p)\cos\alpha\cos\beta]^2 + \\ [(x-x_p)\sin\alpha - (y-y_p)\cos\alpha\sin\beta]^2 \end{aligned} \quad (7)$$

弹头波方程中包含了弹丸射击的俯仰角 α 和水平角 β ,以及飞行弹丸的坐标 $P(x_p, y_p, z_p)$ 。圆锥曲面方程验证:当 $\alpha=\beta=0$ 时,即垂直入射时,方程式可化为:

$$[(y-y_p)^2 + (x-x_p)^2] = \tan^2(\theta) \times (z-z_p)^2 \quad (8)$$

当 $\alpha=\beta=0, x_p=y_p=z_p=0$,可得圆锥的标准形式:

$$x^2 + y^2 = \tan^2(\theta) \times z^2 \quad (9)$$

式(8)、(9)均为圆锥方程的标准形式,从而在理论上验证了该方法推导的弹头波圆锥方程的正确性。

3 基于激波锥面的弹着点定位模型

在弹道线附近布置若干传声器,根据激波锥面掠过各

个传声器产生的模拟信号,将模拟信号进行处理后,可以得到激波锥面掠过各个传声器的时间差。通过分析沿着弹道线运动的激波锥面,利用时间差,激波的锥面方程和已知的传声器坐标可以建立弹着点定位模型,最终计算出弹着点坐标。

头激波的锥面方程入手,根据激波理论,弹丸所处的位置是圆锥波的顶点,弹道线为圆锥的轴线^[10-11],如图2所示。

设弹丸激波顶点坐标为 $P(x_p, y_p, z_p)$, M 为圆锥面上任意一点 (x, y, z) ,与弹道线的距离为 MM_1 ,弹道线的方向向量的俯仰角为 α 和水平角为 β ,马赫角为 θ 。

从图2(b)可知弹道线的方向向量:

$$(m, n, l) = (\cos\alpha \times \sin\beta, \sin\alpha, -\cos\alpha \times \cos\beta) \quad (2)$$

且弹道线过点 $P(x_p, y_p, z_p)$,可得弹道线方程:

$$\frac{x-x_p}{m} = \frac{y-y_p}{n} = \frac{z-z_p}{l} \quad (3)$$

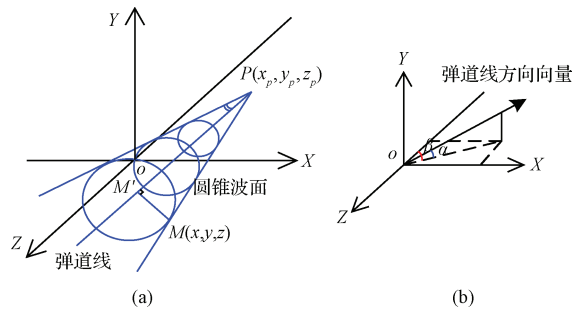


图2 三维空间中的弹丸圆锥激波

从图2(a)可以得到:点 $M(x, y, z)$ 到弹道线的距离为 MM' , MM' 与 PM 关系如下式:

$$\sin(\theta) = \frac{|MM'|}{|PM|} \quad (4)$$

查询数学手册可得,三维空间中点 M 到直线 PM' 的距离公式:

个传声器产生的模拟信号,将模拟信号进行处理后,可以得到激波锥面掠过各个传声器的时间差。通过分析沿着弹道线运动的激波锥面,利用时间差,激波的锥面方程和已知的传声器坐标可以建立弹着点定位模型,最终计算出弹着点坐标。

3.1 弹着点定位算法的推导

本文的模型推导基于以下假设:

1)弹丸的速度大于声速,且弹丸在在靶面附近保持匀速直线运动^[12]。

2)弹丸所产生的激波锥面以弹丸为顶点向前匀速运动。

如图3所示,根据被动声学定位的相关理论,传感器 M_1, M_6 接收到激波的绝对时间对于系统的解算是没有实际意义的,在实际应用中利用的是相对时间差 ΔT 。其中 M_1 相对于 M_6 的时间差为 $\Delta T_{16} = t_1 - t_6$,即在 t_6, t_1 时刻,激波锥面分别掠过 M_6, M_1 ,则得 $|P_1 P_6| = \Delta T_{16} \times V_d$,其中 V_d 为弹丸速度。

设激波掠过 $M_6(x_6, y_6, z_6)$ 时的弹丸位置为 $P_6(x_{p6}, y_{p6}, z_{p6})$;激波掠过 $M_1(x_1, y_1, z_1)$ 时的弹丸位置为 $P_1(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1})$ 。

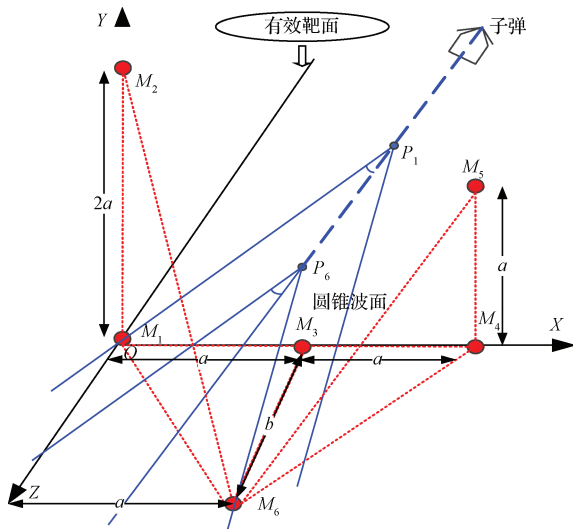


图3 弹着点定位模型

y_{p1}, z_{p1}), 且传感器 M_1, M_6 位置已知, V_d 为弹丸速度。

根据式(2)、(3)可得:

$$\begin{cases} x_{p1} = x_{p6} + \Delta T_{16} \times V_d \times \cos\alpha \times \sin\beta \\ y_{p1} = y_{p6} + \Delta T_{16} \times V_d \times \sin\alpha \\ z_{p1} = z_{p6} - \Delta T_{16} \times V_d \times \cos\alpha \times \cos\beta \end{cases} \quad (10)$$

在 t_1 时刻, 激波锥面掠过传感器 $M_1(x_1, y_1, z_1)$, 根据式(7)可得:

$$\begin{aligned} F(x_1, y_1, z_1) = & \sin^2(\theta) \times \\ & [(x_1 - x_{p1})^2 + (y_1 - y_{p1})^2 + (z_1 - z_{p1})^2] - \\ & [- (y_1 - y_{p1}) \cos\alpha \cos\beta - (z_1 - z_{p1}) \sin\alpha]^2 - \\ & [(z_1 - z_{p1}) \cos\alpha \sin\beta + (x_1 - x_{p1}) \cos\alpha \cos\beta]^2 - \\ & [(x_1 - x_{p1}) \sin\alpha - (y_1 - y_{p1}) \cos\alpha \sin\beta]^2 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

将式(10)代入式(11)可得一个关于 x_{p6}, y_{p6}, z_{p6} 、俯仰角 α 和水平角 β 方程式:

$$F(x_{p6}, y_{p6}, z_{p6}, \alpha, \beta) = 0 \quad (12)$$

式中: 共有 5 个未知量, 要想得到弹道线方程, 必须解算出俯仰角 α 和水平角 β , 以及激波掠过 M_6 时的弹丸坐标 $P_6(x_{p6}, y_{p6}, z_{p6})$, 则至少需要 6 个传感器, 配对成 5 组, 得到 5 个非线性方程。根据测量的时间差以及相应传感器的坐标位置, 代入相应的方程, 通过解算非线性方程组得到俯仰角 α 和水平角 β , 以及激波掠过 M_6 时的弹丸坐标 $P_6(x_{p6}, y_{p6}, z_{p6})$ 。

同理, 对于传感器 M_6, M_2 组, M_6, M_3 组, M_6, M_4 组, M_6, M_5 组也可以得 4 个到关于 x_{p6}, y_{p6}, z_{p6} 、俯仰角 α 和水平角 β 方程式, 联立求解后, 可得弹道线方程:

$$\frac{x - x_{p6}}{\cos\alpha \times \sin\beta} = \frac{y - y_{p6}}{\sin\alpha} = \frac{z - z_{p6}}{-\cos\alpha \times \cos\beta} \quad (13)$$

在靶面位置时: $z=0$, 可得弹着点坐标为:

$$\begin{cases} x_p = \frac{-z_{p6}}{-\cos\alpha \times \cos\beta} \times \cos\alpha \times \sin\beta + x_{p6} \\ y_p = \frac{-z_{p6}}{-\cos\alpha \times \cos\beta} \times \sin\alpha + y_{p6} \end{cases} \quad (14)$$

3.2 传声器阵列的布局

根据激波理论, 激波到达各传声器的时间差取决于传声器的布阵阵列, 对传声器布阵模型进行优化可以增强测量系统的抗干扰能力和解算稳定性。在分析了平面线性三点阵的基础上, 考虑到平面传感器对小角度的俯仰角估计精度偏低的问题, 在 X-Y 平面上增加了两个传感器, 且两个传感器的高度不一致, 以保障俯仰角的估算精度和提高解算稳定性^[13]。构成如图 3 所示的空间六点阵列, 其中, 水平面上为开放式 T 型靶结构, 其中 M_6, M_3 构成一组测速靶, 用于测量弹丸的飞行速度 V_d ; 竖直面上, 在 T 型靶上面布置 2 个高度不一致的传声器, 组成竖直面上的双 L 型靶结构, 提高俯仰角的估算精度。由于篇幅限制, 阵列的优化过程和逐步分析这里就不再赘述。传声器的配对规则为: $M_6 M_1, M_6 M_2, M_6 M_3, M_6 M_4, M_6 M_5$, 即传声器 6 接收到激波时刻为系统零点时刻, 可以作为系统计时的触发装置。选择 $a=2.5 \text{ m}, b=6 \text{ m}$, 根据式(12)可以建立一个包含 5 个非线性方程的方程组。

4 弹着点检测模型的仿真实验

基于圆锥曲面的斜入射弹着点声学检测模型建立在许多理想的条件下, 在这种理想的条件下解算的误差主要来自 MATLAB 迭代算法的优劣, 非线性方程组在收敛速度及收敛性比线性方程组要差, 特别对于非凸的非线性方程组。在解算非线性方程组时选择解算精度较高的算法是很有必要的。本文使用 MATLAB 进行仿真, 在仿真中, 给出仿真条件: 弹丸速度 $V_d = 680 \text{ m/s}$, 声速 $c = 340 \text{ m/s}$, 则马赫角为 θ :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{M_a}\right) = \arcsin\left(\frac{c}{V_d}\right) = 30^\circ$$

先假设出弹着点坐标, 弹道线的俯仰角和水平角。根据弹丸激波的圆锥曲面模型, 利用 MATLAB 先计算出各个传声器接收到激波时刻相对于弹丸在靶面时刻的时间差 Δt_1 , 然后转换为各传感器相对于 M_6 的时间差 Δt_2 , 利用 5 组时间差以及各传感器的坐标位置, 解算非线性方程组反推回俯仰角 α 、水平角 β 和弹着点坐标, 最后做误差分析。部分仿真结果如表 1 和 2 所示。

表 1 中仿真的时间差为负值表示激波曲面掠过此传声器时, 弹丸还未过靶面, 弹丸着靶时刻相对于此时是滞后的。

表 2 可以看出, 在靶面有效范围为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 利用该模型解算的弹着点坐标的系统误差非常小, 其误差来源主要是求解非线性方程组迭代算法的优劣。本模型中应用的是 MATLAB 中封装好的 Fsolve 函数, 仿真验证模型的精度基本上满足要求。在仿真中, 弹道线和靶平面不管垂直与否, 该模型都可以适用。因此在靶场的实际测量中, 利用该模型布靶, 可以更精确的测量到弹着点坐标。

表 1 解算对应弹着点的时间差

弹着点坐标/m	俯仰角 α	水平角 β	传声器坐标/m	$\Delta t_1/s$	$\Delta t_2/s$
(2,3)	$\alpha=5^\circ$	$\beta=10^\circ$	M1(0,0,0)	0.008 159 251	0.009 642 411
			M2(0,5,0)	0.006 938 655	0.008 421 814
			M3(2.5,0,0)	0.007 476 659	0.008 959 819
			M4(5,0,0)	0.011 165 32	0.012 648 48
			M5(5,2.5,0)	0.008 350 681	0.009 833 841
			M6(2.5,0,6)	-0.001 483 16	0
(3,1)	$\alpha=-5^\circ$	$\beta=-10^\circ$	M1(0,0,0)	0.008 796 752	0.011 725 954
			M2(0,5,0)	0.0129 787 74	0.015 907 976
			M3(2.5,0,0)	0.003 068 59	0.005 997 792
			M4(5,0,0)	0.005 276 666	0.008 205 868
			M5(5,2.5,0)	0.005 549 952	0.008 479 154
			M6(2.5,0,6)	-0.002 929 202	0

表 2 利用时间差解算弹着点坐标以及 α, β 角

弹着点坐标/m	俯仰角 $\alpha/(\circ)$	水平角 $\beta/(\circ)$	模型解算横坐标/m	模型解算纵坐标/m	模型解算 $\alpha/(\circ)$	模型解算 $\beta/(\circ)$	模型测量误差 δ_{xy}/mm
(2,3)	$\alpha=5$	$\beta=10$	1.999 999	2.999 998	4.999 967	9.999 997	0.001 167
(2,3)	$\alpha=-5$	$\beta=-10$	2.000 001	3.000 000	-4.999 996	-9.999 971	0.001 029
(3,1)	$\alpha=-5$	$\beta=-10$	2.999 999	0.999 999	-5.000 008	-10.000 017	0.000 394
(3,1)	$\alpha=0$	$\beta=0$	2.999 999	0.999 999	-0.000 004	-0.000 007	0.000 162
(2.5,2)	$\alpha=-30$	$\beta=-30$	2.499 999	2.000 000	-29.999 996	-29.999 999	0.000 126
(1,1)	$\alpha=-10$	$\beta=15$	1.000 000	0.999 999	-10.000 001	15.000 003	0.000 184

5 结 论

本文建立了一种基于圆锥曲面的斜入射弹着点声学检测模型,对该检测模型进行了详细的推导,并验证了该模型的正确性。根据此测量模型确定了一种 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 靶面的布阵模型,利用该模型仿真计算出弹丸激波掠过各传声器相对于传声器 M_0 的时间差,再根据时间差解算出弹着点坐标,以及俯仰角 α 和水平角 β 。利用该模型的难点在于解非线性方程组的迭代算法中起始迭代点的确定,利用合适的起始迭代点,可以更快速的求得准确的解,常用垂直入射模型解算的弹着点作为起始迭代点。本模型中,一次射击可以得到弹丸速度、弹丸的着靶位置以及弹道线的方向,与传统的声靶相比,本文提出的方法更符合实际的射击情况。

参 考 文 献

[1] 黄克平, 应浩, 张亚, 等. 基于开放式 T 靶的弹丸斜入射数学模型[J]. 应用声学, 2010, 29(1): 43-47.
 [2] 路敬祎, 叶东, 陈刚, 等. 双五元十字阵被动声定位融合算法及性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 827-833.
 [3] HUANG Q, WANG T. Acoustic source localization

in mixed field using spherical microphone arrays[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014(1):90.

[4] HUANG Q, ZHANG G, LIU K. Near-field source localization using spherical microphone arrays[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 25(1):159-166.
 [5] 雷鸣, 陈绍钦, 雷志勇. 近地炸点声定位算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(3):734-736.
 [6] 李伟红, 汤海兵, 龚卫国. 公共场所异常声源定位中时延估计方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 750-756.
 [7] 康宝, 于永强, 李宗贤, 等. 基于声探测定位算法及精度分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(4):71-73, 84.
 [8] 叶建森. 基于声延时测量技术的弹落点定位系统的设计与实现[D]. 太原: 中北大学, 2007.
 [9] 刘哲, 陈日林, 滕鹏晓, 等. 基于平面传声器阵列的声源定位系统的研究[J]. 声学技术, 2011, 30(2): 123-126.
 [10] 马少春, 刘庆华, 黄灵鹭. 基于相关峰插值的五元十字阵被动声定位算法[J]. 探测与控制学报, 2014, 36(5):94-98.
 [11] MAHER R. Audio forensic examination[J]. IEEE

Signal Processing Magazine, 2009, 26(2):84-94.

- [12] BAI M R, YAO Y H. Source localization and signal extraction using spherical microphone arrays [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(4):2232-2232.
- [13] 孙云亭, 蔡振江, 程曼, 等. 多超声波传感器局部放电源定位方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):416-422

作者简介

李健, 1991年出生, 工学硕士, 研究方向为检测技术与自动化装置、空中炸点定位技术、声学精度靶。

E-mail: 329895720@qq.com

雷鸣, 男, 硕士, 副教授, 陕西西安人, 主要研究方向为测控技术与通信技术。

是德科技在 2017 年中国移动全球合作伙伴大会上成功展示 移动物联网模组自动化测试解决方案

模组测试解决方案可帮助客户更快完成产品的性能验证

2017年11月24日, 是德科技(NYSE:KEYS)在2017年中国移动全球合作伙伴大会上, 基于 Keysight T3500S 自动化测试系统, 成功展示了移动物联网模组测试解决方案。是德科技与中国移动研究院在物联网测试研究方面开展深入合作, 研发了针对移动物联网模组功耗、射频、定位等关键功能及性能的自动化测试平台 T3500S, 帮助物联网厂商快速验证产品指标并完善关键性能。

物联网模组的通信功能和性能直接影响终端产品的质量, 是保障移动物联网产品质量的核心, 在物联网“芯片-模组-终端”的三段式测试认证体系中占有重要位置。T3500S 移动物联网模组测试解决方案能够高效快速地完成模组产品功能与性能验证, 将从整体上带动移动物联网产品质量提升, 推动移动物联网产业健康快速发展。在此次中国移动全球合作伙伴大会上, T3500S 移动物联网模组自动化测试解决方案, 吸引了产业上下游的关注, 对产业具有重要的影

响力。

是德科技大中华区市场总监郑纪峰表示:“物联网是未来发展的重要方向, 而移动物联网是其中最重要的技术方案之一。我们非常高兴能在2017年中国移动全球合作伙伴大会上, 与产业上下游的客户进行深入交流, 并成功展示是德科技的移动物联网模组自动化测试系统 T3500S。是德科技愿意与更多的产业客户进行合作, 通过完善的物联网测试解决方案, 帮助客户有效把控产品质量并加速产品推向市场, 提升市场竞争力。”

更多信息

关于 Keysight T3500S 物联网模组自动化测试系统的更多信息, 请访问 www.keysight.com/find/contactus 与是德科技取得联系, 了解 Keysight T3500S 系统的价格和交付信息。