



MTS®



高载荷动态机械分析(DMA)

实现粘弹性材料的动态力学参数测定

be certain.

关于动态机械分析(DMA)

橡塑材料, 包括橡胶弹性体材料、热塑性塑料或者热固性塑料等, 被广泛地应用于各种产品之中, 例如车辆、飞机、医疗设备或者日用消费品等等。在使用这些材料的时候, 研究人员和产品设计师需要了解材料的各种力学特性, 特别是相关材料的动态力学参数特性。

所谓动态机械分析(DMA)是获取材料动态力学参数的试验方法, 其试验结果就是在一定频率范围内的应力-应变关系或者载荷-位移关系。粘弹性材料, 包括橡胶、聚合物材料等等, 同时具有弹性材料和粘性材料的力学特性。换言之, 动态机械分析就是获取类似材料的粘弹性特性关系, 一般加载过程采用正弦信号激励的试验方法。

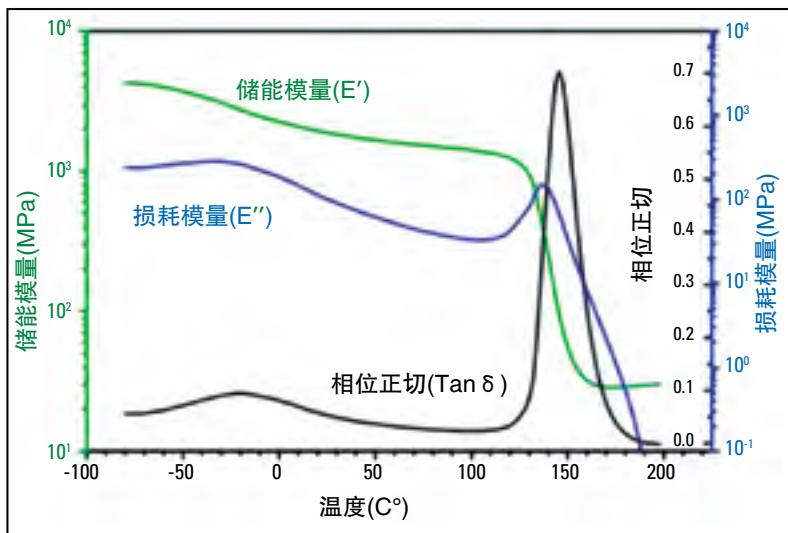
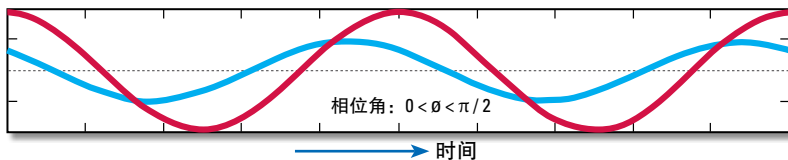
对材料样件施加动态应力, 获取动态应变测量结果:

- » 相位关系(δ): 标准应力与应变之间的相位差;
- » 对于纯弹性材料, 其相位差为 0° , 对于纯粘性材料, 其相位差为 90° ;
- » 对于粘弹性材料具有不同的相位关系;

典型的材料粘弹性属性包括:

- » 储能模量(E'): 表征材料的弹性部分以及相应的刚度值;
- » 损耗模量(E''): 表征材料的粘性部分以及相应的机械能量损耗;
- » 相位正切($\tan \delta$): 表征材料的粘弹性相位差角度正切值;
- » 复数模量关系(E^*): 为应力与应变之间的比值;
- » 当已知材料的复数模量关系(E^*)和相位正切($\tan \delta$), 其余的参数储能模量(E')和损耗模量(E'')就可以通过公式计算得出;

粘弹性的应力应变关系



- » 损耗模量(E'') 是通过材料消散的能量, 一般是热能, 这部分通常是材料的粘性;
- » 储能模量(E') 是材料储存起来的能量, 这部分通常是材料的弹性;
- » 相位正切($\tan \delta$)是上述两个参数的比值, 损耗/储存 或 E''/E' ;

MTS动态力学参数测试应用经验

MTS系统公司的核心竞争力是载荷与位移的精确控制与测量，这是进行材料动态力学参数测试应用的核心。MTS系统公司的材料测试应用历史悠久，起步于航空工业，实现在试验室内重复可控地完成材料力学性能测试。MTS系统公司利用其先进的电液伺服闭环回路控制技术与测试应用软件成为了业内翘楚。现在，这一技术优势被更加广泛地应用在更多的领域，MTS立志于为全球用户创建更好的材料力学测试应用解决方案。

MTS系统公司具有丰富的经验和悠久的历史，成功完成了众多粘弹性材料的力学性能参数测试应用，并且引领了众多试验技术的创新，带来粘弹性材料力学特性参数测试的最佳应用体验。

基于过去数十年的动态测试应用经验，MTS系统公司开发了全系列产品家族用于完成各种粘弹性材料力学特性测试，具有较宽的载荷和多种频率特性供用户选择。无论测试对象是基础的材料还是制件，无论测试的类型包括一般力学特性到动态机械分析应用，还有疲劳、断裂、耐久性、压缩、拉伸、弯曲等试验应用，以及静态力学参数测试应用等等。MTS还能够提供进行生物材料、医学设备等材料和制件测试的试验模板。



动态机械分析测试系统的关键元素

开展动态机械分析测试应用，需要选择合适的测量测试系统，其关键的因素之一就是在工作频率范围内不能存在任何共振的现象，同时还具有足够大的测量范围和足够好的动态控制能力。

免除机械共振

电液伺服力学测试系统进行高频加载应用时可能会引起整个系统的机械共振，如果发生了共振现象，则可能会严重破坏载荷与位移的测量精度，甚至会损坏设备。

当系统发生机械共振时，位移传感器(LVDT 或者编码器)的整体安装结构会出现巨大的震荡，此时的位移反馈会存在较大的误差。当系统发生机械共振时，由于产生了较大的机械加速度，则可能会破坏载荷传感器，同时会带来较大的惯性误差。

好的动态机械分析测试系统需要避免出现机械共振现象，确保各种测量结果的精度满足要求。

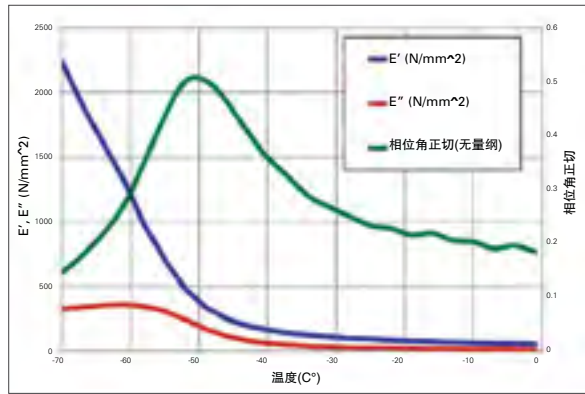
更广泛的动态测试能力

在进行动态机械分析测试应用时，橡胶弹性体材料或者热塑性塑料被测对象往往需要较广泛的动态测试能力，因为此类测试经常处于被测对象的玻璃转换温度附近，此时材料的弹性模量变化可能高达上千倍。弹性材料在玻璃转换温度之下坚硬如玻璃一样，然而在玻璃转换温度之上时，材料却柔软如融化的糖果。

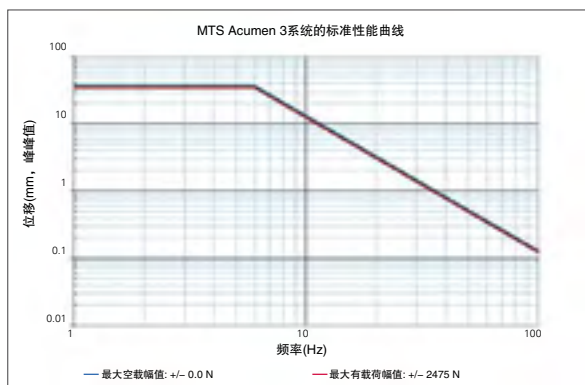
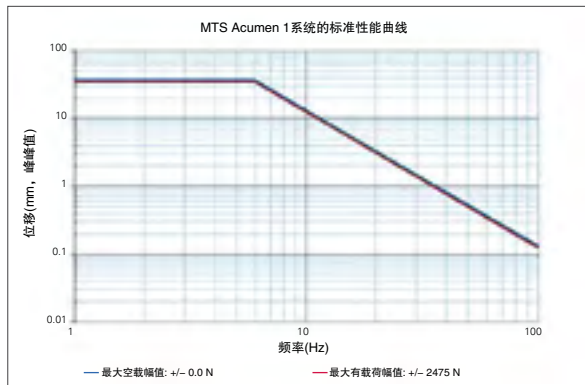
这就意味着，如果使用恒定幅值载荷加载，则样件在玻璃转换温度之下时，其变形量会非常小，然而在玻璃转换温度之上时，样件的变形量会放大上千倍。同样，如果使用恒定幅值位移加载，则样件在玻璃转换温度之下时，其载荷值会非常大，然而在玻璃转换温度之上时，样件的载荷值会缩小上千倍。对于测试系统而言，同一个系统需要考虑到这两种试验状况的出现，也就是说，这种系统本身就需要有足够宽泛的测量测试区间，具有足够的域度和精度满足试验需求。

动态幅值控制

大多数橡胶弹性体或者热塑性塑料具有很强的非线性特性，换言之，如果测量此类材料的弹性模量，则加载的幅值可能会影响到测试的结果。这就要求测试系统精确控制向被测对象施加的激励幅值。对于很多高频加载试验系统来说，实现这种高频条件下的幅值精确控制非常困难。如果控制回路本身带宽较低或者外回路补偿存在一定的延迟，则试验件需要通过较多的额外循环来达到加载所需要的幅值，这样会让样件内部温度变高，产生错误的测试结果。如果没有有效的控制算法，控制回路会变得不稳定，因此无法获取精确的动态机械分析结果。



5



MTS Acumen®高载荷动态机械分析测试解决方案

动态机械分析测试应用需要对载荷和位移实现精确的控制与测量，然后计算出被测对象的动刚度参数。对于典型的动态机械分析应用，需要准确控制动态载荷或者位移的均值，同时精确控制动态载荷或者位移的幅值。如果出现了机械共振现象，则动刚度测量就不被准确实现。

一流的精度

MTS Acumen电动式力学测试系统具有安全、能效比高的特点，是进行动态机械分析以及疲劳测试应用的理想选择。采用直线往复电机加载的载荷框架在工作范围内免除了机械共振，有效提高了动态机械分析的测量测试精度。

加速度补偿

在进行动态机械分析测试应用时，由于存在进行高频加载的状况，因此，需要测试系统具有足够的补偿能力来实现惯性载荷的修正工作。MTS系统公司的测试系统采用具有专利的加速度补偿技术，其高性能传感器以及优秀的算法实现了微小载荷的惯性误差修正，满足动态机械分析测试应用的高精度小载荷测量要求。

高分辨率位移测量

MTS Acumen电动式力学测试系统采用数字增量编码器实现高精度的位移测量，可以实现高达0.008mm的峰峰值位移测量，具有极佳的可重复性和控制能力。这些特性对于进行动态机械分析测试应用来说非常重要。

低载荷测试应用

如果需要实现例如低至0.2N峰峰值载荷的控制与测量，则可以选择高性能低载荷测试应用附件，这套附件具有满量程5N或10N的测试能力，增加了高级动态补偿(ADR)传感器，与系统传感器集成在一起。此时，系统传感器用于测量载荷均值，而这套低载荷测量附件来测量载荷峰谷值。另外，高级动态补偿传感器充分发挥加速度补偿，以提升测试精度，确保把惯性误差降至最低。

对于某些试验应用，通常选择第二个载荷传感器，采用级联形式与系统传感器安装在一起。不过对于动态机械分析应用来说，这种做法无法满足高精度的要求。

蠕变与应力松弛

MTS Acumen电动式力学测试系统也可以实现一些静态力学测试，例如蠕变与应力松弛。进行蠕变测试时，对样件施加的应力保持恒定值，然后测量样件变形量与时间之间的关系。而对于应力松弛测试应用，则保持相应的位置不动，测量样件应力与时间之间的关系。

MTS Acumen的动态机械分析应用

- » 免除机械共振设计；
- » 专利技术的加速度补偿消除动态测量误差；
- » 高精度数字编码器，实现高精度的位移测量；
- » 高级动态补偿(ADR)传感器实现高频低载荷的高精度测量；
- » 具有足够的试验测试空间可以容纳较大体积的材料；
- » 一目了然的图形化测试系统应用软件，提高测试效率；



全套动态机械分析测试应用附件

每一种测试任务都具有独特的试验需求

需要根据被测对象来选择正确的附件，实现正确的试验设计。MTS系统公司为各种测试任务开发了种类丰富的夹具、工装、环境箱等试验附件产品，经过充分的考验，验证其胜任动态机械分析测试应用。



环境箱

7



双动作剪切拉伸夹具



弯曲夹具



剪切夹具



拉伸/压缩夹具



拇指型旋钮夹具



压盘



手动动作拉伸试验夹具



滚轮动作拉伸试验夹具



双向动作悬臂梁弯曲试验夹具

动态机械分析测试应用软件

MTS 793.31 动态机械分析测试应用软件可以实现粘弹性材料或者制件的众多动力学参数测定。粘弹性材料样件的形式多样，一定程度上增加了弹性模量计算的复杂程度，在该软件中，用户可以设置不同样件的形式和尺寸，便于进行动态弹性模量的计算。

主要特性

- » 内嵌扫频 – 可以定义内嵌扫频过程，所有变量可同步进行修改或者单独修改；
- » 混合模式 – 分别设置幅值与均值的控制模式：
 - 均值控制参数 – 包括载荷、位移、应变或者应力；
 - 幅值控制参数 – 包括载荷、位移、应变、加速度或者应力；
- » QC极限定义 – 根据数据计算结果的范围以及设置的极限，对于QA/QC应用非常有用；
- » 自动修正 – 当样件反馈与实际价值波形出现了偏差，软件将利用幅值-相位补偿(APC)算法来补偿相应的误差。同时还可以实时修正不正确的加速度、进行加载路径修正，修正机械或者电信号相位以及传感器的高频衰减；

玻璃转换测量

在工作频率范围内，0.01Hz~1000Hz，可以采集四十个应变幅值，而同时可以计算对应的弹性模量，完成玻璃转换温度的测量工作。

有限元分析工具兼容性

测试数据以纯文本格式(ASCII)导出，可以被有限元分析工具软件读取并且分析材料的特性。

部件试验特性

如果试验对象是部件，MTS 793.31动态机械分析测试应用软件可以进行相应的动力学参数测试，包括弹性率(储能刚度)、阻尼系数(C)、转化率以及迟滞能量等。

ELASTOMEREXPRESS™ 试验应用软件
该软件是简化版的动态机械分析试验应用软件，包括标准的测试模板用于自动化的试验应用，特别适合大量测试任务的QA/QC试验。

ELASTOMEREXPRESS试验应用软件最大化测试应用的效率，减少操作人员的交互参数设置。

可以完成大多数动力学参数的测试任务：

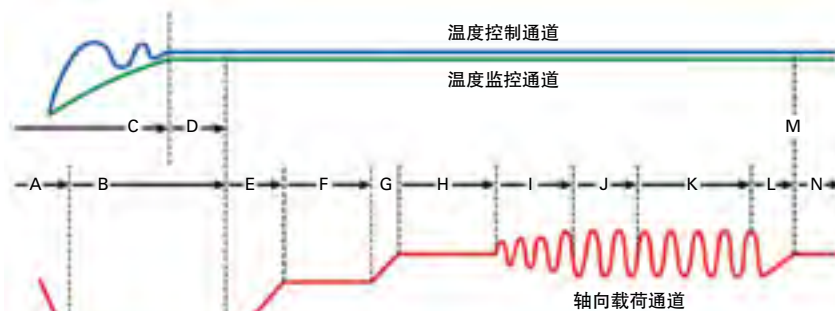
- » 刚度系数(K)
- » 阻尼系数(C)
- » 弹性模量(E / G)
- » 相位角正切($\tan \delta$)

扫频过程可以采用固定频率间隔、对数间隔或者混合的方式来实现：

- » 频率
- » 均值
- » 幅值
- » 温度
- » 相位(多通道试验)

动态机械分析软件：

- » MTS 793.31 动态机械分析试验应用软件
- » MTS 793.30 ElastomerExpress
- » MTS 793.33 静态力学分析试验应用软件



动态机械分析测试典型组成

- A. 斜坡至保持载荷；
- B. 保持，等待温度恒定；
- C. 温度稳定；
- D. 温度保持；
- E. 斜坡至零载荷；
- F. 应力松弛；
- G. 斜坡至均值或者预设载荷；
- H. 均值段保持；
- J. 预循环；
- K. 采集数据循环；
- L. 返回均值或基点；
- M. 采集温度；
- N. 处理数据；

扫频测试示例

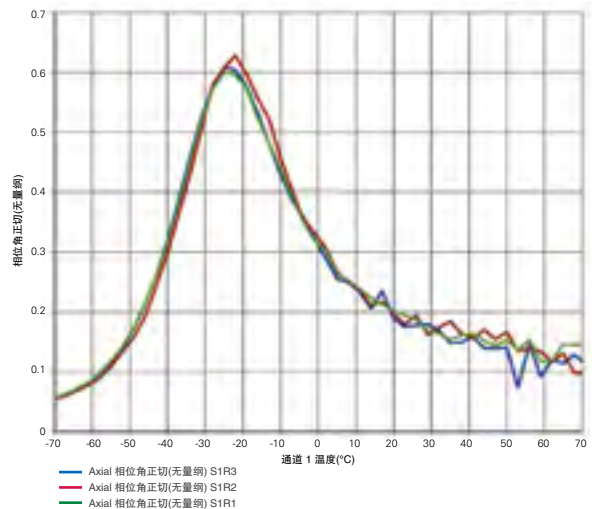
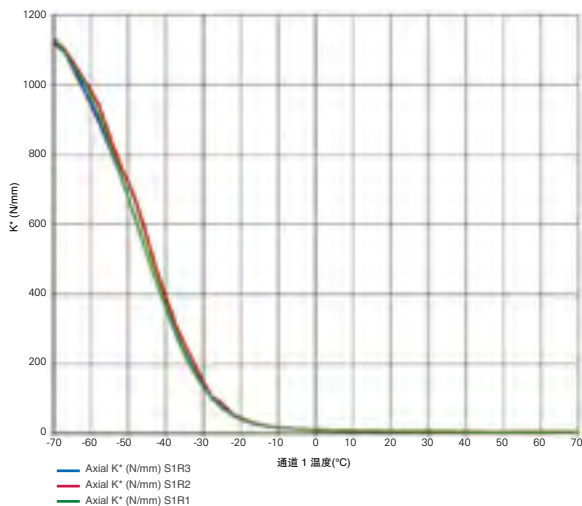


测试参数

频率: 0.2Hz ~ 100Hz, 15个采集每个扫频;
 均值: -100N
 动态幅值(峰峰值): 25N

9

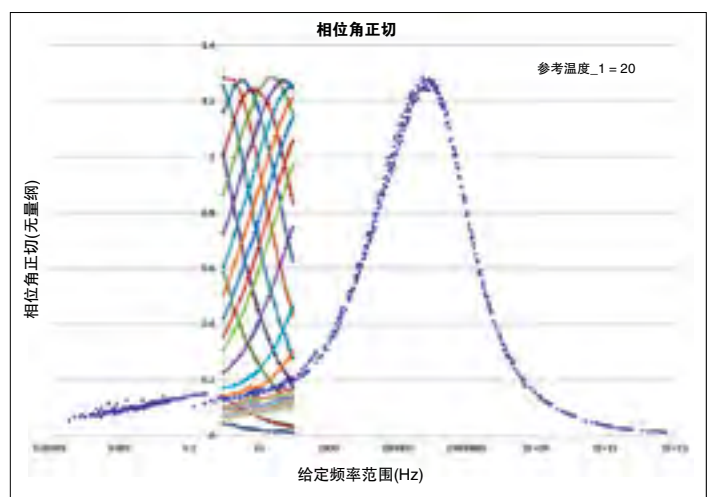
典型曲线: K*和相位角正切值



时温等效原理叠合曲线

高聚物的同一力学松弛现象可以在较高的温度、较短的时间(或较高的作用频率)下观察到,也可以在较低的温度下、较长时间内观察到。因此,升高温度与延长观察时间对分子运动是等效的,对高聚物的粘弹行为也是等效的,这就是时温等效原理。利用该原理,可以得到一些无法直接从试验测量得到的结果。

MTS 的测试应用软件可以绘制时温等效原理叠合曲线,该曲线使用WLF模型,是一种简单易用,基于Excel应用软件的图形化工具,可以绘制出材料至MHz甚至GHz频段的力学属性曲线,这一频段远超实际测试系统的工作频率范围。时温等效原理叠合曲线可以充分洞悉被测软件的力学性能参数。



时温等效原理叠合曲线 - WLF模型

粘弹性材料力学性能的多样化测试能力

MTS系统公司具有丰富的产品线，可以实现粘弹性材料力学性能参数的精确测试。现在，各行各业利用这类设备开展了多项产品的研发，包括先进材料以及制件。并且MTS系统公司跟随客户的需求发展，不断推陈出新，适应更加严苛的试验需求。

广泛的测试系统产品家族

MTS系统公司的解决方案采用电液伺服试验技术或者直线电机驱动技术，其产品涵盖了广泛的载荷能力范围（0.0002kN~250kN），宽泛的频率范围(0.01Hz~1000Hz)，满足很多行业的多样化测试需求。

力学试验应用的专家

MTS系统公司在很多力学试验应用领域都享有盛名，包括粘弹性材料的动态力学参数测试应用，以及疲劳与断裂、耐久、拉伸与压缩、弯曲、静态参数测定等不同类型测试应用。

应用支持

MTS系统公司全球一体化的技术服务与支持团队能够帮助用户快速掌握试验技术和产品应用，系统集成工程师和应用工程师将丰富的软硬件支持与应用经验带给全球的客户。



用于粘弹性材料力学测试的MTS测试系统

及时响应的全球服务与支持

MTS系统公司遍及全球的专业化服务与支持团队是广大用户成功的基础。在利用MTS的测试系统开展试验时，最具经验的专业团队为用户提供全生命周期的服务与支持，延长测试系统的持续工作时间，让试验室变得更有效率。无论是设备安装之前的场地勘验，还是设备安装与验收，一直到最后的设备退役，MTS专业化的服务解决方案能够帮助用户实现高效率的试验任务安排、数据完整型以及性能的优化，并且满足用户紧张的预算需求。

咨询服务

MTS可以为用户提供全套的专业化工程服务，包括系统工程、测试咨询、场地规划设计等等。

现场服务

MTS现场服务工程师遍布全球，经过良好培训的产品专家为客户提供及时迅速的服务响应。

培训

MTS的培训服务计划包括客户现场的培训或培训中心的教室培训课程。产品培训专家为广大客户提供手把手式的培训服务，帮助用户快速掌握电液伺服系统知识，熟悉软硬件操作，满足试验操作人员的岗前培训需要。

校准与对中调试

所有力学性能试验室都需要对其所拥有的力学试验设备进行定制的校准或标定工作，以确保其试验数据的可靠性和可追溯性。MTS系统公司可以提供高质量的校准服务，并且该服务符合计量认证的要求。同时，也可以提供载荷框架的对中调试服务。

维护与监视

基于数十年力学性能试验系统的应用经验，MTS系统公司开发了若干例行检查的计划，可以根据用户所选购的试验系统进行必要的裁剪，确保用户的设备长期有效地工作。

升级服务

随着技术不断的进步以及试验需求的不断发展，试验系统也需要不断更新设计来扩展试验能力，延长设备的使用寿命。MTS系统公司可提供升级服务来替换老旧的控制器，升级试验应用软件。对于电液伺服系统也可以进行必要的升级来满足性能提升的要求。

欢迎咨询MTS系统公司：

- » 丰富多样的动态机械分析与疲劳测试应用解决方案；
- » 标准的动态机械分析测试方法；
- » 完整的解决方案，包括橡胶弹性体、生物材料、聚合物材料、复合材料、QA/QC测试应用等；
- » 时温等效原理叠合曲线与分析；
- » 动态机械分析测试咨询服务；



地区业务中心

美洲

MTS Systems Corporation

14000 Technology Drive
Eden Prairie, MN 55344-2290

USA

电话: 952-937-4000
免费电话: 800-328-2255
电子邮件: info@mts.com
网址: www.mts.com

欧洲

MTS Systems France

BAT EXA 16
16/18 rue Eugène Dupuis
94046 Créteil Cedex

France

电话: +33-(0)1-58 43 90 00
电子邮件: contact.france@mts.com

MTS Systems (Germany) GmbH

Hohentwielsteig 3
14163 Berlin

Germany

电话: +49-(0)30 81002-0
电子邮件: euroinfo@mts.com

MTS Systems S.R.L. socio unico

Strada Pianezza 289
10151 Torino

Italy

电话: +39-(0)11 45175 11 sel. pass.
电子邮件: mtstorino@mts.com

MTS Systems Norden AB

Datavägen 37b
SE-436 32 Askim

Sweden

电话: +46-(0)31-68 69 99
电子邮件: norden@mts.com

MTS Systems Limited

98 Church Street,
Hunslet,
Leeds
LS102AZ

United Kingdom

电话: +44-(0)1483-533731
电子邮件: mtsuksales@mts.com

亚太区

MTS Japan Ltd.

Raiden Bldg. 3F 3-22-6,
Ryogoku, Sumida-ku,
Tokyo 130- 0026

Japan

电话: +81 3 5638 0850
电子邮件: mtsj-info@mts.com

MTS Korea, Inc.

4th F., ATEC Tower, 289,
Pankyo-ro, Bundang-gu
Seongnam-si
Gyeonggi-do 463-400,

Korea

电话: +82-31-728-1600
电子邮件: mtsk-info@mts.com

MTS Systems (China) Co., Ltd.

Floor 34, Building B,
New Caohejing International
Business Center,
No. 391, Guiping Road,
Xuhui, Shanghai 200233

P.R.China

电话: +021-24151000
市场: +021-24151111
销售: +021-24151188
服务: +021-24151198
邮件: mtsc-info@mts.com

MTS Testing Solutions Pvt Ltd.

Unit No. 201 & 202, Second Floor
Donata Radiance,
Krishna Nagar Industrial Layout,
Koramangala, Bangalore - 560029
Karnataka, India

电话: + 91 80 46254100
电子邮件: mts.india@mts.com



美特斯工业系统(中国)有限公司
MTS Systems(China) Co., Ltd.

上海

电话: 021-24151000
传真: 021-24151199

北京

电话: 010-65876888
传真: 010-65876777

电邮: MTSC-Info@mts.com
<http://www.mts.com>
<https://www.mtschina.com/>

ISO 9001 Certified QMS

MTS、MTS Landmark、MTS Acumen是MTS系统公司的注册商标，
这些商标在美国境内注册，在其他国家和地区也受到法律保护。
RTM No. 211177.

©2020 MTS Systems Corporation
100-385-923 DMAolutions_ZH 5/20