ICS
CCS

团　　体　　标　　准

T/CMES XXXX—202X

数控机床广义可靠性评价方法

Generalized reliability evaluation method for CNC machine tools

(征求意见稿)

中国机械工程学会标准征求意见稿

XXXX-XX-XX 发布　　XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内，国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制，修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家，成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制，传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048　电话：010-68799027　传真：010-68799050

网址：www.cmes.org　联系人：袁俊瑞　电子信箱：yuanjr@cmes.org

目　　次

目　　次 II
前　　言 III
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 故障判定与计数 2
5 抽样原则与数量 3
6 试验工况及数据采集要求 4
7 试验时间 4
8 广义可靠性评价指标 4
9 评价结果 7
附录 A　（资料性） 8
附录 B　（资料性）　表 B.1 机床运行时间记录表 9
附录 C　（资料性）　表 C.1 机床运行工况记录表 10
附录 D　（资料性）　表 D.1 机床故障记录表 12
附录 E　（资料性）　数控机床广义可靠性评价示例 13

中国机械工程学会标准征求意见稿

前　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：吉林大学、沈阳机床股份有限公司等。

本文件主要起草人：郭劲言、杨兆军、陈传海、刘志峰、张亮、张旺、田海龙、孟庆宇等。

本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

数控机床广义可靠性评价方法

1 范围

本文件规定了数控机床广义可靠性评价的术语和定义、故障判定与计数、抽样要求、试验工况与数据采集、试验时间、评价指标计算、评价结果与报告及结果判定。

本文件适用于数控机床在规定试验条件或实际服役工况下的可靠性、维修性及可用性评价，以及不同工况下可靠性指标的等效比较。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 23567.1—2009 数控机床可靠性评定 第 1 部分：总则

3 术语和定义

GB/T 23567.1—2009 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用，以下重复列出了 GB/T 23567.1—2009 中的某些术语和定义。

3.1

广义可靠性 generalized reliability

综合考虑数控机床的可靠性、维修性、可用性及实际运行工况等因素，对其完成规定功能的能力进行综合表征。

3.2

平均故障间隔时间 mean time between failures；MTBF

可修复系统在相邻两次故障之间的平均工作时间间隔。

[GB/T 23567.1—2009，定义 3.7]

3.3

广义平均故障间隔时间 generalized mean time between failures；GMTBF

考虑实际运行工况与基准工况的差异，对平均故障间隔时间进行等效修正后得到的评价指标。

3.4

平均首次故障时间 mean time to first failure；MTTFF

系统从开始工作到首次发生故障所经历的平均工作时间。

中国机械工程学会标准征求意见稿

3.5

广义平均首次故障时间 generalized mean time to first failure；GMTTFF
考虑实际运行工况与基准工况的差异，对平均首次故障时间进行等效修正后得到的评价指标。

3.6

平均修复时间 mean time to repair；MTTR
可修复系统由故障状态恢复到正常工作状态所需修复时间的平均值。

3.7

关联故障 relevant fault
在解释试验或工作结果或者计算可靠性量值时必须计入的故障。
[GB/T 23567.1—2009，定义 3.2]

3.8

非关联故障 non-relevant fault
在解释试验或工作结果或者计算可靠性量值时应予排除的故障。
[GB/T 23567.1—2009，定义 3.3]

3.9

工况参数 working condition parameter
用于表征数控机床实际运行状态的参数。

3.10

基准工况 reference working condition
为进行不同机床或不同使用场景之间的可靠性指标比较而规定的参照工况。

3.11

工况严酷度系数 working-condition severity coefficient
表征实际工况相对基准工况严酷程度的无量纲系数。

4 故障判定与计数

4.1 故障判定原则

在试验过程中，出现下列情况之一的，应判定为故障：

a) 机床或其组成部分丧失一项或多项规定功能；
b) 机床或其组成部分的性能参数超出产品技术文件规定的允许范围；
c) 机床零部件、结构件或元器件出现松动、损坏、失调、堵塞、泄漏等异常状态，影响其规定功能的正常实现；
d) 机床出现危及人员、设备或工件安全，需立即中止规定任务的异常状态。

4.2 关联故障的判定

在试验过程中，发生下列情况之一的，应判定为关联故障：

中国机械工程学会标准征求意见稿

a) 由于机床自身设计、制造、装配、软件、元器件或零部件等原因，导致机床丧失或降低规定功能，且需要通过修复、调整、更换或其他纠正措施恢复规定功能的故障；
b) 具有规定使用寿命的易损件，在规定寿命期内提前失效而引起的故障。

4.3 非关联故障的判定

在试验过程中，发生下列情况之一的，应判定为非关联故障：

a) 从属性故障

由受试机床某一故障直接引起的其他零部件或元器件的继发性故障，不单独计为关联故障。原发故障应按照关联故障判定原则进行判定。

b) 误用性故障

由于操作人员未按规定要求操作或使用机床而引起的故障，如安装不当、施加超出规定范围的载荷、未按要求调整相关部件等。

c) 诱发性故障

由于维修人员操作不当而引起的故障，如在维修过程中造成其他正常零部件或元器件损坏等。

d) 外部因素引起的故障

由于外部供电、试验设备异常或使用环境超出规定条件而引起的故障，如突然断电、电网电压或频率异常、温湿度超限、外部振动或电磁干扰超限等。

4.4 故障计数原则

a) 同一根本原因引起多个故障现象或继发性损坏时，应按一次故障事件计数；属于关联故障的，按一次关联故障计数；
b) 故障修复并恢复规定功能后，再次发生符合关联故障判定条件的新故障时，应重新计数；
c) 计划性维护及达到规定使用寿命后易损件的正常更换，不计为故障；
d) 按照 4.3 判定的非关联故障，不计入关联故障次数，但应予以记录；
e) 对故障原因、性质或计数存在争议时，应由评价方、制造方及使用方共同确认，并记录判定依据及结果。

5 抽样原则与数量

5.1 抽样原则

样机应满足以下要求：

a) 具有合格的性能和功能，或具有出厂合格证；
b) 为新产品或符合正常生产条件下生产的批量产品；
c) 按正常使用工况使用。

5.2 抽样数量

样机应按 5.1 规定从相应产品总体中随机抽取。抽样数量推荐值见表 1；批量产品按比例计算得到非整数时，应向上取整，且抽样数不应超过实际批量。

表 1 抽样数量推荐值

产品类型	新产品	批量产品	
抽样数量	≥ 1	批量 ＜ 50	批量 ≥ 50

中国机械工程学会标准征求意见稿

		≥ 2	≥ 5 %

6 试验工况及数据采集要求

开展实际工况下的可靠性评价时，应根据机床类型、加工任务及评价要求，采集机床运行时间、加工工况、环境条件及故障维修等数据。采集内容应包括：

a) 机床及试验基本信息，包括机床名称、型号、出厂编号、制造单位、使用单位、机床类型、试验起止日期及主要技术参数等，记录表见附录 A；

b) 运行时间数据，包括试验日期、班次、运行状态、停机及恢复使用时刻、本班与累计有效工作时间等，记录表见附录 B；

c) 运行工况数据，包括工况区间编号、起止时刻、有效工作时间、工件材料、工艺参数、切削力或切削功率、主轴转速、主轴负载率及换刀次数等，记录表见附录 C；

d) 故障维修数据，包括故障事件编号、发生时刻、故障现象、故障原因、恢复时刻、维修耗时及关联故障判定结果等，记录表见附录 D。

试验应按照加工任务或主要工况参数变化划分记录区间。各区间有效工作时间之和应与同期运行时间记录核对一致；停机维修时间不应计入有效工作时间。

7 试验时间

试验时间应根据产品类型、预期平均故障间隔时间及抽样数量确定。各类产品最低累计有效试验时间见表 2。

表 2 试验时间要求值

产品类型	最低累计有效试验时间	单台样机均衡分配试验时间
新产品	$2MTBF_0$	$2MTBF_0$
批量产品（批量<50）	$3MTBF_0$	$3MTBF_0$ /n
批量产品（批量≥50）	$4MTBF_0$	$4MTBF_0$ /n

表中：

$MTBF_0$ ——预期平均故障间隔时间，单位为小时（h），应依据产品设计指标、技术协议或同类产品数据于试验前确定；

n——实际试验样机数量。批量产品累计有效试验时间为各样机有效工作时间之和；表中单台均衡分配值用于试验安排，不表示每台机床必须达到相同的最低工作时间。

注：有效试验时间不包括停机维修、待机以及其他非有效工作时间。

8 广义可靠性评价指标

8.1 工况严酷度系数 k

工况严酷度系数 k 用于表征机床实际工况相对于基准工况的严酷程度。当实际工况较基准工况严酷时，$k>1$；当实际工况与基准工况基本一致时，$k\approx1$；当实际工况较基准工况轻缓时，$k<1$。

$$k = w_n k_n + w_s k_s + w_t k_t \quad (1)$$

式中，各工况参数因子的定义与计算方法见表 3，工况基准参考值见表 4，权重推荐值见表 5。

中国机械工程学会标准征求意见稿

表 3 工况参数因子及计算公式

工况参数	工况参数因子计算公式	说明
主轴转速（r/min）	$k_n = \frac{n}{n_0}$	n 为主轴平均转速；n_0 为基准主轴转速（磨削类取砂轮主轴转速）
主轴负载率（%）	$k_s = \frac{X_s}{X_{s0}}$	X 为区间平均主轴负载率；X 。为基准主轴负载率
换刀频率（次/h）	$k_t = \frac{f_t}{f_{t0}}$	f 为单位有效工作时间的换刀次数；f 。为基准换刀频率（次/h）；不具备该功能时不适用。

表 4 不同类型数控机床工况基准参考值

工况参数	工况基准符号	车削类	铣削类	磨削类	镗削类	钻削类
主轴转速（r/min）	n_0	$0.325n_{max}$	$0.40n_{max}$	$0.70n_{max}$	$0.225n_{max}$	$0.40n_{max}$
主轴负载率（%）	X_{s0}	52.5%	47.5%	32.5%	57.5%	42.5%
换刀频率（次/h）	f_{t0}	7	14	/	6.5	14

表中：

n_{max}：产品技术文件规定的最高主轴转速。

注：对于具有多种加工功能的机床，可按主要加工类型选取参考基准；必要时结合实际加工任务确定。

表 5 权重推荐值

权重项	符号	车削类	铣削类	磨削类	镗削类	钻削类
主轴转速权重	w_n	1/3	1/3	1/2	1/3	1/3
主轴负载率权重	w_s	1/3	1/3	1/2	1/3	1/3
换刀频率权重	w_t	1/3	1/3	/	1/3	1/3

注：当机床不具备自动换刀等相应功能时，该项工况参数不适用，权重取零；其余适用参数的权重应按其原权重占适用参数权重总和的比例重新归一化，使适用参数权重之和为 1。

当试验期间存在多个工况区间时，应分别计算区间严酷度 k_i，综合严酷度可按各区间有效工作时间Δt_i加权，计算公式如下：

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^{m} k_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{m} \Delta t_i} \quad (2)$$

式中：

m：该台机床记录的工况区间数量；

k_i：第 i 个区间的工况严酷度系数；

Δt_i：第 i 个区间的有效工作时间，单位为小时（h）。

中国机械工程学会标准征求意见稿

多台机床同时参加试验时，应首先分别计算各台机床的综合工况严酷度系数；确需汇总时，可按各台机床累计有效工作时间加权。区间数据应与附录 B 的有效工作时间和附录 C 的记录区间对应。

8.2 平均故障间隔时间 MTBF

$$MTBF = \frac{\sum_{j=1}^{n} T_j}{\sum_{j=1}^{n} r_j} \quad (3)$$

式中：

T ：第 j 台机床评定期间的累计有效工作时间，单位为小时（h）；

r ：第 j 台机床评定期间的累计关联故障次数。

如果到定时截尾试验时间，机床没有出现故障，则 MTBF 的估计值按照公式(4)计算。

$$MTBF = k_c T \quad (4)$$

式中：

T：定时截尾试验总试验时间，单位为小时（h）。

k_c 取值见表 6。

表 6 k_c 取值表

置信水平C	k_c 值
60%	0.9194
70%	0.8394
80%	0.7620
90%	0.6762
95%	0.6195
99%	0.5367

8.3 广义平均故障间隔时间 MTBFg

$$MTBF_g = \bar{k} \cdot MTBF \quad (5)$$

8.4 平均首次故障时间 MTTFF

$$MTTFF = \frac{\sum_{j=1}^{n} t_{F_j}}{n} \quad (6)$$

式中：

t_{Fj}：评定周期内第 j 台机床的首次故障时间，单位为小时（h）。

注：如果到定时截尾试验时间，机床未出现故障，则MTTFF取值与MTBF相同。

8.5 广义平均首次故障时间 MTTFFg

$$MTTFF_g = \frac{\bar{k}\left(\sum_{j=1}^{n} t_{F_j}\right)}{n} \quad (7)$$

式中：

t_{Fj}：评定周期内第 j 台机床的首次故障时间，单位为小时（h）。

8.6 平均修复时间 MTTR

$$MTTR = \frac{\sum_{j=1}^{n} t_{R_j}}{\sum_{j=1}^{n} r_j} \quad (8)$$

中国机械工程学会标准征求意见稿

式中：

t_{Rj}：评定周期内第 j 台机床的累积修复时间，单位为小时（h）。

8.7 可用度 A

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (9)$$

8.8 广义可用度 Ag

$$A_g = \frac{MTBF_g}{MTBF_g+MTTR} \quad (10)$$

9 评价结果

完成规定的试验或现场跟踪后，应按第 8 章计算相关可靠性指标。评价结果应依据产品技术文件、合同、评价任务书或供需双方约定，可以选择全部或部分目标值进行可靠性判定。规定有置信水平要求时，应采用相应可靠性指标的置信下限进行判定。未规定合格判据时，评价结果仅用于表征和比较机床的广义可靠性水平，不作合格与否判定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

附 录 A
（资料性）

表 A.1 机床及试验基本信息记录表

项目	记录内容	项目	记录内容
机床名称/型号		出厂编号	
制造单位		使用单位/地点	
机床类别	□车 □铣 □磨 □镗 □钻	试验起止日期	
最高主轴转速 n_{max}（r/min）		主轴转速基准值 n_0（r/min）	
主轴负载率基准值 X_{s0}（%）		换刀频率基准值 f_{t0}（次/h）	（若不适用，填“—”）

中国机械工程学会标准征求意见稿

附 录 B

（资料性）

表 B.1 机床运行时间记录表

日 期	班次(填写具体时间段)			运行情况			有效工作时间(h)	操作者(签名)
	1班	2班	3班	正常	停机			
					停机时间（年-月-日/时：分）	恢复使用时间（年-月-日/时：分）		
20 年 月 日	(8：00 16：00)							
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		
20 年 月 日					：	：		

中国机械工程学会标准征求意见稿

附 录 C
（资料性）

表 C.1 机床运行工况记录表

记录项目	记录值	记录项目	记录值
区间编号		记录日期	____年__月__日
开始时刻	____时____分	结束时刻	____时____分
有效工作时间 Δt_i（h）		工件材料	
加工工序/程序号		刀具/加工方式	
切削速度 v_c（m/min）		背吃刀量 a_p（mm）	
进给量 f（mm/r）或 f_z（mm/z）		切削宽度 a_e（mm）	
切削力 F_c（N）		切削功率 P_c（kW）	
平均主轴转速 n_i（r/min）		平均主轴负载率 $X_{s,i}$（%）	
换刀次数 $N_{t,i}$（次）	（若不适用，填“—”）	换刀频率 $f_{t,i}$（次/h）	（若不适用，填“—”）

填写说明：

1. 每个工况区间填写本表一份，区间编号应与附录 B、附录 D 关联；各区间有效工作时间之和应与同期累计有效工作时间核对一致。

2. 主轴负载率应优先通过数控系统或专用测量装置获取。当无法直接获取时，须依次记录切削速度 v_c（m/min）、背吃刀量 a_p（mm）、进给量 f（mm/r）或每齿进给量 f_z（mm/z）、切削宽度 a_e（mm），采用与加工类型相适应的经验公式估算切削功率。不同加工类型的切削功率可按下列方法计算。

$$X_S = \frac{P_s}{P_r(n)} \times 100\% \quad \text{(C.1)}$$

式中：

P_s —— 主轴电机实际输出功率，单位为千瓦（kW）；

$P_r(n)$ —— 主轴在相应转速下的额定连续输出功率，单位为千瓦（kW）。

a）车削类机床。对于连续车削等加工工况，可根据单位切削力、背吃刀量、每转进给量及切削速度，按下式估算切削功率：

$$P_c = \frac{k_c a_p f v_c}{60 \times 10^3} \quad \text{(C.2)}$$

b）铣削类机床。对于常规面铣、周铣等加工工况，可根据切削深度、切削宽度、工作台进给速度及单位切削力，按下式估算切削功率：

$$P_c = \frac{k_c a_p a_e v_f}{60 \times 10^6} \quad \text{(C.3)}$$

工作台进给速度宜直接采用机床记录值；需要根据每齿进给量计算时，可采用下式：

$$v_f = f_z z n \quad \text{(C.4)}$$

c）磨削类机床。对于以砂轮为主要切削工具的磨削加工，可根据切向磨削力及砂轮圆周速度，按下式近似计算切削功率：

中国机械工程学会标准征求意见稿

$$P_c \approx \frac{F_t v_s}{10^3} \quad \text{(C.5)}$$

d）镗削类机床。对于单刃镗削等连续切削工况，可在满足相应刀具及切削条件的情况下，参照车削类机床的单位切削力法，按下式近似估算切削功率：

$$P_c \approx \frac{k_c a_p f v_c}{60 \times 10^3} \quad \text{(C.6)}$$

当镗削形式、刀具结构或加工条件与上述近似模型不符时，应选用相应镗削经验公式进行计算。

e）钻削类机床。对于钻孔加工，已知钻削转矩时，可根据主轴转速按下式计算切削功率：

$$P_c = \frac{2\pi n M_c}{60 \times 10^3} \quad \text{(C.7)}$$

当钻削转矩无法获取时，对于符合实心钻孔假设的加工工况，可根据孔径、进给量、主轴转速及适用的单位切削力参数，按下式近似估算：

$$P_c \approx \frac{\pi D^2 f n \times k_c}{240 \times 10^6} \quad \text{(C.8)}$$

式中：

P_c ——切削功率，单位为千瓦（kW）；

k_c ——与工件材料、刀具及切削条件相适应的单位切削力，单位为牛顿每平方毫米（N/mm²）；

a_p ——背吃刀量或轴向切削深度，单位为毫米（mm）；

a_e ——径向切削宽度，单位为毫米（mm）；

f ——每转进给量，单位为毫米每转（mm/r）；

f_z ——每齿进给量，单位为毫米每齿（mm/z）；

v_c ——切削速度，单位为米每分（m/min）；

v_f ——工作台进给速度，单位为毫米每分（mm/min）；

z ——用于进给计算的刀齿数，无量纲；

n ——主轴转速，单位为转每分（r/min）；

F_t ——切向磨削力，单位为牛顿（N）；

v_s ——砂轮圆周速度，单位为米每秒（m/s）；

M_c ——钻削转矩，单位为牛顿米（N·m）；

D ——钻头直径，单位为毫米（mm）。

经验公式中的单位切削力及其他相关参数，应依据所采用的切削工艺手册、刀具技术资料或经验证的试验数据确定，并记录公式来源、参数取值及适用条件。

中国机械工程学会标准征求意见稿

附 录 D

（资料性）

表 D.1 机床故障记录表

企业名称： 故障日期： 年 月 日

<table>
<tr><td colspan="2">出厂编号：</td><td colspan="3">主轴型号：</td></tr>
<tr><td colspan="5">机床名称：</td></tr>
<tr><td>故障时间</td><td colspan="4">起始停机 月 日 时 分
终止停机 月 日 时 分</td></tr>
<tr><td>维修时间</td><td colspan="2">维修开始时刻 月 日 时 分
维修结束时刻 月 日 时 分</td><td colspan="2">人员等待时间(小时)：____
备件等待时间(小时)：____</td></tr>
<tr><td colspan="3">故障现象：</td><td colspan="2" rowspan="4">故障照片</td></tr>
<tr><td colspan="3">故障部位：</td></tr>
<tr><td colspan="3">故障原因：</td></tr>
<tr><td colspan="3">故障溯源</td></tr>
<tr><td colspan="3">故障处理：</td><td colspan="2" rowspan="3">维修照片</td></tr>
<tr><td>更换元件名称</td><td>规格型号</td><td>数量</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">是否为关联故障：</td></tr>
</table>

维修人员：_____ 维修人数：_____ 设备使用人:_____

注：维修开始时刻：通知维修人员机床出现故障的时刻；维修结束时刻-维修开始时刻约等于人员等待时间+备件等待时间+纯维修时间

中国机械工程学会标准征求意见稿

附 录 E
（资料性）
数控机床广义可靠性评价示例

E.1 示例说明

以一台数控车床在外圆车削典型工况下的可靠性试验为例，演示广义可靠性评价的主要过程。本例的设备参数、工况及故障数据均为假设数据，仅用于说明计算方法，不作为实际机床可靠性水平的判定依据。

E.2 设备及试验数据

表 E.1 车床基本信息与典型工况参数（示例）

项目	取值	项目	取值
机床类型	数控车床（外圆车削）	工件及刀具	45 钢；硬质合金车刀
主轴最高转速 nmax	4000 r/min	实际主轴转速 n	1500 r/min
加工直径 D	50 mm	背吃刀量 ap	3.0 mm
每转进给量 f	0.25 mm/r	主轴电机实际输出功率 Ps	6.60 kW（实测）
对应转速额定功率 Pr(n)	11.00 kW	累计换刀次数 Nt	16000 次
预期 MTBF0	500 h	累计有效工作时间 T	2000 h
关联故障总次数 r	4 次	试验样机数量	1 台

为便于说明，故障发生时刻按自试验开始累计的有效工作时间记录。4 次关联故障的修复时间见表 E.2，每次修复并恢复规定功能后继续试验。

表 E.2 关联故障与修复记录（示例）

故障序号	故障出现时累计有效工作时间（h）	故障现象（简述）	修复时间（h）
1	420	主轴冷却风机异常	2
2	830	刀架定位异常	3
3	1250	液压站压力不足	4
4	1770	进给伺服报警	3
合计	—	关联故障 4 次	12

E.3 广义可靠性评价计算过程

a）核对试验时间。按表 2，新产品单台机床最低累计有效试验时间为预期 MTBF 的 2 倍。本例计算如下：

$$T_{min} = 2\,MTBF_0 = 2 \times 500 = 1000\ h \cdots\cdots (E.1)$$

本例实际累计有效试验时间为 2000 h，大于 1000 h，满足示例采用的最低试验时间要求。

b）确定基准工况。按表 4，车削类机床的基准主轴转速为最高主轴转速的 0.325 倍，基准主轴负载率为 52.5%，基准换刀频率为 7 次/h。

中国机械工程学会标准征求意见稿

$$n_0 = 0.325 n_{max} = 0.325 \times 4000 = 1300 \text{ r/min} \cdots\cdots (E.2)$$

根据表 5，车削类机床主轴转速、主轴负载率及换刀频率的权重均取 1/3；本例三项工况参数均适用，无需重新归一化。

c）获取实际工况参数。按附录 C 的功率法口径，以对应转速下主轴电机实际输出功率与额定连续输出功率之比计算主轴负载率；换刀频率按累计换刀次数除以累计有效工作时间计算。

$$X_s = \frac{P_s}{P_r(n)} \times 100\% = \frac{6.60}{11.00} \times 100\% = 60.0\% \cdots\cdots (E.3)$$

$$f_t = \frac{N_t}{T} = \frac{16000}{2000} = 8.00 \text{ 次/h} \cdots\cdots (E.4)$$

d）计算工况参数因子与严酷度系数。依据表 3 和式（1），分别得到主轴转速因子、主轴负载率因子和换刀频率因子：

$$k_n = \frac{1500}{1300} = 1.1538, \quad k_s = \frac{60.0}{52.5} = 1.1429, \quad k_t = \frac{8}{7} = 1.1429 \cdots\cdots (E.5)$$

$$k = \frac{1}{3}(k_n + k_s + k_t) = 1.1465 \cdots\cdots (E.6)$$

本例 k＝1.1465，大于 1，表示按本文件规定的加权工况参数模型，该工况相对于车削类基准工况较为严酷。

e）计算平均故障间隔时间及其广义指标。本例累计关联故障次数为 4，按照第 8.2、8.3 节计算：

$$MTBF = \frac{T}{r} = \frac{2000}{4} = 500.00 \text{ h} \cdots\cdots (E.7)$$

$$MTBF_g = k \times MTBF = 1.146520 \times 500 = 573.26 \text{ h} \cdots\cdots (E.8)$$

本例发生了关联故障，采用累计有效工作时间与累计关联故障次数之比进行计算；不适用第 8.2 节的零故障威布尔置信下限系数表。

f）计算平均首次故障时间及其广义指标。该样机首次故障发生在累计有效工作 420 h 时，按第 8.4、8.5 节计算：

$$MTTFF = \frac{t_{F1}}{1} = 420.00 \text{ h} \cdots\cdots (E.9)$$

$$MTTFF_g = k \times MTTFF = 1.146520 \times 420 = 481.54 \text{ h} \cdots\cdots (E.10)$$

g）计算平均修复时间、可用度和广义可用度。按照第 8.6～8.8 节规定的统计口径，本例修复时间合计为 12 h，计算如下：

$$MTTR = \frac{2+3+4+3}{4} = 3.00 \text{ h} \cdots\cdots (E.11)$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{500}{500+3} = 99.40\% \cdots\cdots (E.12)$$

中国机械工程学会标准征求意见稿

$$A_g = \frac{MTBF_g}{MTBF_g+MTTR} = \frac{573.26}{573.26+3} = 99.48\% \cdots\cdots (E.13)$$

E.4 评价结果及说明

表 E.3 数控车床广义可靠性评价结果汇总（示例）

评价项目	符号	计算结果	单位
工况严酷度系数	k	1.1465	—
平均故障间隔时间	MTBF	500.00	h
广义平均故障间隔时间	MTBFg	573.26	h
平均首次故障时间	MTTFF	420.00	h
广义平均首次故障时间	MTTFFg	481.54	h
平均修复时间	MTTR	3.00	h
可用度	A	99.40	%
广义可用度	Ag	99.48	%

本例未设定合同或产品技术文件中的可靠性合格判据，故仅演示各指标的计算过程，不作合格与否判定。计算过程中保留未舍入值参与后续运算，结果按表 E.3 的位数表示。

中国机械工程学会标准征求意见稿